

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ІНЖЕНЕРНО-ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФІЗИКИ МЕТАЛІВ**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри
_____ Є.В. Іващенко
«__» _____ 2018 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 132 Матеріалознавство
на тему: «Синтез композиційних покриттів ультразвуковою ударною обробкою
титанового сплаву ВТ6»**

Виконав:
студент VI курсу, групи ФМ-71мп
Могилко Владислав Віталійович _____

Керівник:
ст. викладач КФМ, к.т.н.,
Владимирський І.А. _____

Консультанти із експериментальної частини:
старший науковий співробітник, д.ф.-м.н.,
Мордюк Б.М. _____

професор КФМ, д.ф.-м.н.,
Волошко С.М. _____

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях:
професор, д.т.н.,
Левченко О.Г. _____

Консультант із розробки стартап-проекту:
доцент, к.е.н.,
Глущенко Я.І. _____

Консультант із питань нормоконтролю:
асистент КФМ,
Шаповалова Н.А. _____

Рецензент:
ст. викладач МТО, к.т.н.,
Аршук М.В. _____

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає
запозичень з праць інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інженерно-фізичний факультет

Кафедра фізики металів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою
Спеціальність (спеціалізація) – 132 Матеріалознавство (Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

_____ Є.В. Іващенко

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Могилку Владиславу Віталійовичу

1. Тема дисертації «Синтез композиційних покриттів ультразвуковою ударною обробкою титанового сплаву ВТ6», науковий керівник дисертації Владимирський Ігор Анатолійович, ст. викладач КФМ, к.т.н., затверджені наказом по університету від «09» листопада 2018 р. № 4127-с
2. Термін подання студентом дисертації _____
3. Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси, які відбуваються внаслідок ультразвукової ударної обробки поверхні титанового сплаву ВТ6 методом.
4. Вихідні дані: титановий сплав ВТ6, порошки Al_2O_3 та Si_3N_4
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: провести ультразвукову ударну обробку поверхні сплаву ВТ6 з метою синтезу композитних покриттів; дослідити структурно-фазові стани поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6 у вихідному стані та після проведення ультразвукової ударної обробки із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha-Si_3N_4$ та $\beta-Si_3N_4$; проаналізувати комплекс властивостей синтезованих покриттів титанового сплаву ВТ6 до та після ультразвукової ударної обробки;
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 34 рисунка та презентація.
7. Орієнтовний перелік публікацій: Х міжнародна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених “Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів”: Синтез композиционных покрытий с повышенной жаростойкостью ультразвуковой ударной обработкой сплава ВТ6; Механічні властивості, фазовий та хімічний склад поверхні сплаву ВТ6 після

УЗУО в хімічно активних та нейтральному середовищах, VI міжнародна науково-практична конференція "Структурна релаксація у твердих тілах": Підвищення жаростійкості сплаву ВТ6 формуванням оксидних композиційних покриттів УЗУО, Авторське свідоцтво "Механохімічний синтез корозійностійких покриттів ультразвуковою ударною обробкою легких конструкційних сплавів", Стаття в журналі "Металофізика та новітні технології": Підвищення жаростійкості сплаву ВТ6 формуванням оксидних композитних шарів за УЗУО.

8. Консультанти розділів дисертації**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Експериментальна частина	Мордюк Б.М., старший науковий співробітник, д.ф-м.н.		
Експериментальна частина	Волошко С.М., професор КФМ, д.ф-м.н.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Левченко О.Г., професор, д.т.н.		
Розробка стартап-проекту	Глущенко Я.І., доцент, к.е.н.		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд джерел та написання літогляду		
2.	Підготовка зразків для ультразвукової ударної обробки (УЗУО), електронно-мікроскопічні дослідження порошків		
3.	Проведення УЗУО та термічної обробки, гравіметрія		
4.	Електронно-мікроскопічні та рентгенівські дослідження зразків після УЗУО		
5.	Проведення випробувань на корозійну- та зносостійкість		
6.	Аналіз результатів та написання диплому		
7.	Захист		

Студент

В.В. Могилко

Науковий керівник дисертації

І.А. Владимирський

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 98 с., 5 ч., 19 табл., 34 рис., 57 джерел.

УЛЬТРАЗВУКОВА УДАРНА ОБРОБКА, НІТРИД КРЕМНІЮ, ОКСИД АЛЮМІНІЮ, ВІДПАЛ, ГРАВІМЕТРІЯ.

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси, які відбуваються внаслідок ультразвукової ударної обробки поверхні титанового сплаву ВТ6 методом.

Предмет дослідження – жаростійкість, корозійні властивості та зносостійкість поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки з порошками Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$.

Метою роботи є синтез композитних покриттів шляхом ультразвукової обробки сплаву ВТ6 із використанням порошків оксиду алюмінію Al_2O_3 та нітридів кремнію $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, а також дослідження їх властивостей.

Методи дослідження – в роботі використано комплекс сучасних експериментальних методів фізичного матеріалознавства. Проведено рентгеноструктурний та електронно-мікроскопічний аналізи, гравіметричні дослідження, а також дослідження на зносо- та корозійну стійкість.

Визначено вплив ультразвукової ударної обробки із застосуванням порошків оксидів Al_2O_3 та нітридів Si_3N_4 різних модифікацій на жаростійкість властивості сплаву та перевірено можливість синтезу захисних покриттів на його поверхні.

Здійснено визначення товщин нанесених покриттів за допомогою методу растрової електронної мікроскопії та програмного додатку типу Gwyddion.

ABSTRACT

Master's thesis: 98 p., 5 chapters, 19 tables, 34 figures, 57 sources.

ULTRASONIC IMPACT TREATMENT, SILICON NITRIDE, ALUMINUM OXIDE, ANNEALING, GRAVIMETRY.

Object of the study – the physical and chemical processes which occur during ultrasonic impact treatment of the surface of the titanium VT6 alloy.

Subject of the study – heat resistance, corrosion properties and wear resistance of surface layers of titanium VT6 alloy after ultrasonic impact treatment with Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ and $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ powders.

Aim of the work is to synthesize composite coatings by ultrasonic impact treatment of the VT6 alloy with application of aluminum oxide and $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ and $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ silicon nitrides powders, as well as to investigate their properties.

Research methods – complex of modern experimental methods of physical material science has been used in this work. X-ray and electron-microscopic analyzes, gravimetric measurements, as well as studies on wear and corrosion resistance were carried out.

The influence of ultrasonic impact treatment with Al_2O_3 oxide powders and Si_3N_4 silicon nitrides of various modifications on the heat resistant properties of the alloy has been determined and the possibility of synthesis of protective coatings on its surface has been investigated.

The thickness of the coatings was determined using the scanning electron microscopy method and Gwyddion software application.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	8
ВСТУП	9
1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД	11
1.1 Титан та його сплави	11
1.2 Сплав ВТ6	14
1.3 Захисні покриття та методи їх нанесення.....	17
1.3.1 Захисні покриття Al_2O_3 , Si_3N_4	19
1.4 Ультразвукова ударна обробка.....	21
1.5 Висновки до розділу 1	25
2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	26
2.1 Використані матеріали	26
2.2 Технологія нанесення покриттів	28
2.3 Методики дослідження.....	30
2.3.1 Растрова електронна мікроскопія.....	30
2.3.2 Рентгеноструктурний фазовий аналіз	33
2.3.3 Гравіметричний аналіз.....	35
2.3.4 Корозійні дослідження	35
2.3.5 Випробування на зношування	37
2.4 Висновки до розділу 2	38
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	39
3.1 Жаростійкі властивості сплаву ВТ6 після синтезу компонентних покриттів методом ультразвукової ударної обробки із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha-Si_3N_4$ та $\beta-Si_3N_4$	39
3.2 Морфологія і хімічний склад поверхні сплаву ВТ6 після УЗУО та наступної термічної витримки	43
3.3 Аналіз мікроструктурних станів сформованих в процесі УЗУО покриттів	50
3.4 Фазовий склад поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки.....	55

3.5 Корозійні властивості титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки із використанням порошків	59
3.6 Зносостійкість і трибологічні властивості покриттів на сплаві ВТ6	62
3.7 Висновки до розділу 3	66
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	67
4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві	67
4.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів	67
4.2.1 Мікроклімат	67
4.2.2 Освітленість	70
4.2.3 Шум	71
4.2.4 Вібрації	72
4.2.5 Електробезпека	73
4.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці	74
4.3.1 Організація робочого місця	74
4.3.2 Вентиляція	75
4.4 Розрахунок інженерного рішення	75
4.4.1 Розрахунок вентиляції	75
4.5 Вимоги безпеки праці у надзвичайних ситуаціях	77
4.5.1 Пожежна безпека	77
4.5.2 Безпека праці у аварійних ситуаціях	78
4.6 Висновки до розділу 4	79
5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	80
5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)	80
5.2 Висновки до розділу 5	88
ВИСНОВКИ	89
CONCLUSION	91
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	93

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ВПТВЕ – вакуумна плазмова технологія високих енергій;

УЗУО – ультразвукова ударна обробка;

КТР – коефіцієнт термічного розширення;

УЗП – ультразвуковий перетворювач;

НВЧ – низькочастотний вібратор;

РЕМ – растрова електронна мікроскопія;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ГТЛ – газотурбінні лопатки;

ГТД – газотурбінні двигуни.

ВСТУП

Проблеми сучасного матеріалознавства приводять до постійного пошуку та дослідження нових процесів та матеріалів, а також технологій їх отримання та обробки. Зміна властивостей добре відомих матеріалів, розробка нових технологій їх обробки є актуальним завданням.

На сьогодні титанові сплави є найбільш часто використовуваними, технологічними та перспективними матеріалами. Використання даних сплавів охоплює найбільші сфери виробництва та науки. Варто відмітити, що темпи використання сплавів титану інтенсивно збільшуються, особливо в авіабудуванні.

Також необхідно зазначити, що найбільші європейські запаси титану зосереджені саме в Україні. Важливим фактором, що визначає актуальність використання титанових сплавів в Україні є той факт, що вона відноситься до країн, які мають досвід створення авіаційної техніки та авіазапчастин (повний цикл виробництва).

Особливе місце серед титанових сплавів займає сплав ВТ6 (Grade5), який отримав широкого використання у виробництві авіаційної техніки та газотурбінної техніки (лопаток двигунів і т.п.). Однак основною проблемою його використання є низька жаростійкість, яка обмежує значення робочої температури в інтервалі 350 °С – 450 °С. Це призводить до поступового зношення деталей, необхідності їх заміни, та неможливості їх використання у відповідальних вузлах газотурбінних двигунів у зв'язку із високим ризиком виходу із ладу даного вузла.

Актуальність. У зв'язку із проблемами виробництва та потребами економії і ресурсозбереження пропонується використання ультразвукового ударного впливу для синтезу композиційних захисних покриттів на поверхні титанового сплаву ВТ6.

Метою роботи є синтез композитних покриттів шляхом ультразвукової обробки сплаву ВТ6 із використанням порошків оксиду алюмінію Al_2O_3 та нітридів кремнію $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, а також дослідження їх властивостей.

Відповідно до мети роботи поставлено наступні задачі дослідження:

- 1) опрацювати сучасні джерела та підготувати літературний огляд;
- 2) провести ультразвукову ударну обробку поверхні сплаву ВТ6 з метою синтезу композитних покриттів;
- 3) дослідити структурно-фазові стани поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6 у вихідному стані та після проведення ультразвукової ударної обробки із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$;
- 4) проаналізувати комплекс властивостей синтезованих покриттів титанового сплаву ВТ6 до та після ультразвукової ударної обробки;
- 5) узагальнити отримані результати і сформулювати висновки.

Об'єкт дослідження – фізико-хімічні процеси, які відбуваються внаслідок ультразвукової ударної обробки поверхні титанового сплаву ВТ6 методом.

Предмет дослідження – жаростійкість, корозійні властивості та зносостійкість поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки з порошками Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$.

1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

1.1 Титан та його сплави

Титан – це сріблясто-білий метал (відноситься до легких внаслідок відносно низької густини $\sim 4505 \text{ кг/м}^3$) із температурою плавлення в інтервалі температур $1640^\circ\text{C} - 1680^\circ\text{C}$ [1, 2]. Температура випаровування становить $\sim 3170^\circ\text{C}$ [2]. Для чистого титану спостерігається поліморфне перетворення за температури $\sim 882^\circ\text{C}$: в інтервалі температур до 882°C існує стійка α -фаза з гексагональною щільнопакованою ґраткою ($a = 2,951 \text{ \AA}$, $c = 4,679 \text{ \AA}$). За вищих температур відбувається поліморфне переворення в β -фазу з кубічною об'ємоцентрованою ґраткою $a = 3,269 \text{ \AA}$. Температура фазового переходу суттєво змінюється при додаванні відповідних домішок та легуючих елементів, наприклад, алюмінію чи ванадію [3].

Основною характеристикою, яка виділяє титанові сплави серед інших є висока корозійна стійкість (набагато перевищує корозійну стійкість нержавіючих сталей), яка обумовлена утворенням щільних оксидних плівок титану та алюмінію (у випадку сплаву ВТ6) на поверхні [2, 4, 5]. Варто відмітити, що титанові сплави характеризуються стійкістю при роботі у природних умовах: атмосфері, ґрунті, прісній чи морській воді [2].

Загалом основною характеристикою, за якою класифікуються титанові сплави є фазовий склад. Виділяють наступні сплави [2]:

- 1) α -сплави, структурні елементи представлені виключно α -фазою;
- 2) псевдо- α -сплави, в яких з'являється невелика кількість β -фази $\sim 5\%$;
- 3) $(\alpha+\beta)$ -сплави, структурні елементи представлені виключно α - та β -фазами;
- 4) псевдо- β -сплави, структурні елементи представлені виключно β -фазою, лише за умови загартування чи нормалізації із β -області. Після відпалу

структура характеризується наявністю невеликої кількості α -фази та великої кількості β -фази;

5) β -сплави, структурні елементи представлені термодинамічно стабільною β -фазою;

6) сплави на основі інтерметалідних з'єднань.

Також титанові сплави мають ряд переваг порівняно з іншими конструкційними матеріалами: високу питому міцність, високу жароміцність, добру зварюваність [6]. У таблиці 1.1 наведено характеристики найбільш часто застосовуваних титанових сплавів.

Таблиця 1.1 – Характеристики найбільш широко застосовуваних титанових сплавів [7]

Марка сплаву	Хімічний склад, об'ємні %	Максимальна робоча температура, °C
BT16	Ti-5Mo-4,5V-3Al	350
BT22	Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe	400
BT6	Ti-6Al-4V	450
BT8	Ti-6,5Al-3,5Mo-0,3Si	480
BT18y	Ti-7Al-4Zr-2,5Sn-1Nb-0,7Mo-0,2Si	550-600

Перераховані вище переваги (характеристики) обумовлюють широке використання титанових сплавів у відповідальних галузях промисловості та техніки, особливо в авіаційній та авіакосмічній промисловості, судно- та автомобілебудуванні, гірництві, хімічній промисловості та медицині [7, 8].

Основною галуззю у якій використання титанових сплавів займає провідне місце є авіаційна промисловість [8]. В даній гільці промисловості титанові сплави застосовуються для:

- 1) виготовлення облямівки люків чи дверей, обшивки каркасів літаків, виготовлення трубопроводів повітряної системи, настилення підлоги вантажної кабіни, тощо;
- 2) виготовлення стояків шасі, силових елементів механізації крила, гідроциліндрів;
- 3) виготовлення деталей газотурбінних двигунів;
- 4) виготовлення деталей з підвищеною відповідальністю для роботи при незначних температурах, наприклад, виготовлення каналів повітрозбірників, трубопроводів, гідросистем, деталей кріплення.

Найперспективнішим напрямком у розвитку авіаційної та автомобілебудівельної промисловості є збільшення коефіцієнту корисної дії агрегату за рахунок зменшення його ваги. Також важливим параметром для вибору матеріалу є висока міцність та зносостійкість. Саме вище перелічені характеристики є необхідними для розвитку цього напрямку. Тому збільшення темпів використання виробів з титану у даній промисловості є цілком логічним [8].

Також потрібно зазначити, що титан використовується не лише для виготовлення відповідальних вузлів агрегатів та турбобудування, а й у хімічній промисловості. В останній титан займає важливе місце, особливо у виготовленні теплообмінників, випарювальної апаратури, сушарок, ємностей та насосів високої стабільності. Загалом близько 10 % світового ринку титану припадає на виробництво медичного обладнання та спортінвентаря [8].

Можна підсумувати, що титанові сплави характеризуються комплексом унікальних властивостей, а саме високою корозійною стійкістю та міцністю, що робить їх відмінними конструкційними матеріалами для застосування в багатьох галузях промисловості, особливо в авіа- та суднобудуванні.

1.2 Сплав ВТ6

Вітчизняний сплав ВТ6 належить до найбільш поширених титанових сплавів, не лише на пострадянському просторі, а й у всьому світі. Його закордонним аналогом є сплав Grade 5 (Ti-6Al-4V) [6].

Сплав відноситься до двофазних, тобто належить до ($\alpha+\beta$)-сплавів за загальноприйнятою класифікацією. Згідно даних опублікованих у закордонних журналах, $\sim 50\%$ титану, що використовується в авіації належить саме сплаву Grade 5 (вітчизняний аналог – ВТ6) [6].

Як було вказано раніше, ВТ6 є деформівним двофазним сплавом, який вирізняється однорідністю хімічного складу, надзвичайно високою технологічністю та зниженими значеннями чутливості до концентраторів напружень [7]. Основна галузь його використання – авіаційна промисловість, у якій його найчастіше застосовують для виготовлення крупногабаритних зварних та збірних конструкцій авіаційних апаратів, у газотурбобудуванні (близько 40% від ваги турбіни), виробництві балонів та компресорів низького і високого тиску, тощо [6]. Цей сплав також широко використовується у ракетобудуванні, де він зайняв провідне місце при виготовленні балонів високого тиску паливних систем в ракетах типу “Атлас”, “Титан-2”, “Аполон”, тощо [9].

В суднобудівельній промисловості цей сплав є основним у виробництві лопаток роторів та статорів, які застосовуються у парових турбінах та морських двигунах, завдяки своїй високій корозійній стійкості та стабільності роботи в газових та морських атмосферах, внаслідок утворення тонких захисних оксидних плівок на поверхні [9].

Основним недоліком даного сплаву, що обмежує його використання у виготовленні відповідальних вузлів агрегатів, які мають працювати за умов підвищених температур є низькі жаростійкі властивості (при температурах вище $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ відбуваються процеси інтенсивного окиснення сплаву, і як наслідок, втрати технологічності). Питанню окиснення титанового сплаву ВТ6

присвячено ряд робіт, до прикладу, в роботі [10] встановлено, що інтенсивність окислення сплаву змінюється за параболічною залежністю від температури відпалу. Встановлено, що стадія інтенсивного окиснення починається при температурах близько 600 °С і вище, а значення приросту маси становить $\sim 0,02$ мг/мм² при даній температурі та 0,4 мг/мм² – при 800 °С та тривалості відпалу 50 годин. Також показано, що стабільність новоутворених на поверхні титанового сплаву оксидних плівок прямопропорційно залежить від часу відпалу. Подібні результати отримані в роботі [11], де досліджено кінетику окиснення титанового сплаву ВТ6 в інтервалі температур 600 °С – 700 °С. Результати свідчать, що інтенсивність окиснення стрімко зростає із підвищенням температури відпалу:

1) для температури відпалу 600 °С з тривалістю витримки 100 годин приріст маси становить $\sim 0,2$ мг/мм², при збільшенні тривалості відпалу до 200 годин – 0,7 мг/мм²;

2) для температури відпалу 650 °С з тривалістю витримки 100 годин приріст маси становить $\sim 0,6$ мг/мм², при збільшенні тривалості відпалу до 200 годин – 1,5 мг/мм²;

3) для температури відпалу 700 °С з тривалістю витримки 100 годин приріст маси становить $\sim 1,7$ мг/мм², при збільшенні тривалості відпалу до 200 годин – 4,2 мг/мм².

В роботі [12] показано, що навіть при температурах відпалу 650 °С – 750 °С тривалістю від 3 годин до 6 годин відбувається інтенсивне окиснення сплаву ВТ6, прямопропорційно до часу відпалу.

У таблиці 1.2 наведено хімічний склад сплаву ВТ6.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сплаву ВТ6 у % (об'ємних) [1]

Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H
до 0,5	до 0,1	до 0,1	3,5- 5,3	до 0,05	86,45- 90,9	5,3- 6,8	до 0,3	до 0,2	до 0,015

Із аналізу таблиці випливає, що до основних легуючих елементів сплаву ВТ6 належать алюміній та ванадій.

Згідно літературних джерел, введення алюмінію дозволяє [2]:

- 1) підвищити питому міцність сплаву ВТ6, зберігаючи задовільну пластичність;
- 2) підвищити жароміцні та жаростійкі властивості сплаву;
- 3) підвищити робочий ресурс сплаву у середовищі водню за рахунок зменшення схильності до водневої крихкості.

Проте введення алюмінію призводить до погіршення робочого ресурсу сплаву у морському середовищі за рахунок підвищення рівня чутливості до сольової корозії [2, 9].

Введення ванадію, як легуючої домішки, дозволяє покращити жароміцні та жаростійкі властивості сплаву внаслідок підвищення термічної стабільності. Високі значення розчинності ванадію в титані ($> 3\%$) відкривають ряд перспектив, що дозволяють створювати сплави із хорошою зварюваністю та здатністю до зміцнення за рахунок термічної обробки при збереженні високого рівня технологічної пластичності [9].

Можливо підвести підсумки щодо основних характеристик титанового сплаву ВТ6:

- 1) висока технологічність, однорідність хімічного складу;
- 2) знижений рівень чутливості до наявності концентраторів напружень;
- 3) основні легуючі елементи алюміній та ванадій покращують ряд його властивостей;

4) основним недоліком є низька жаростійкість, що обмежує робочий інтервал температур використання до 400 °С – 450 °С.

1.3 Захисні покриття та методи їх нанесення

Існує багато методів підвищення ресурсу деталей агрегатів за рахунок легування, нанесення захисних покриттів, тощо. Основним методом підвищення жаростійких властивостей титанового сплаву ВТ6 є синтез захисних покриттів на його поверхні. Ці покриття умовно поділяються на дифузійно та конденсаційно синтезовані [13].

Дифузійні покриття представляють собою захисні покриття в яких у процесі синтезу та подальшого відпалу, відбувається взаємна дифузія між хімічними елементами матеріалу-основи (Ті – у випадку жароміцного сплаву ВТ6) та матеріалу, що осаджується на поверхню останнього. Тобто, хімічний склад, а отже, і комплекс властивостей даних захисних покриттів визначається не лише матеріалом, що осаджується, але й складом матеріалу-основи [13].

Найпоширеніші методи осадження дифузійних захисних покриттів, що застосовуються у світі [13]:

- 1) дифузійне насичення поверхні, наприклад, вакуумним осадженням або імпульсним методом;
- 2) шлікерний метод;
- 3) золь-гель метод;
- 4) гаряче занурення деталей у розплав захисного матеріалу;
- 5) електрохімічні та хімічні методи.

Загалом, незалежно від методу нанесення покриттів, основними законами, які регулюють процеси, що відбуваються в процесі осадження є закони дифузії в межах відповідних діаграм стану дво- або багатокомпонентних систем [13].

Конденсаційні захисні покриття представляють собою покриття із яскраво вираженою перехідною зоною між осаджуваним матеріалом та матеріалом

основи. Тобто, структура та склад даних покриттів визначаються виключно матеріалом, що осаджується та технологією нанесення даного матеріалу. В цілому методи осадження конденсаційних захисних покриттів зазнали більшої поширеності, ніж дифузійні, внаслідок можливості зміни (керування) фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей покриттів, а також синтезу багат шарових, комбінованих та композитних покриттів [13]. Варто додати, що саме за рахунок нанесення конденсаційних покриттів відбувається суттєве збільшення жаростійких властивостей обробленої деталі.

Найбільш поширені в промисловості методи нанесення конденсаційних покриттів [13]:

- 1) термічне вакуумне випаровування;
- 2) катодне розпорошення;
- 3) іонно-плазмове та плазмове осадження;
- 4) технологія електронно-променевого осадження.

На пострадянському просторі розроблено метод вакуумної плазмової технології високих енергій (ВПТВЕ), який успішно застосовується для синтезу жаростійких багатокомпонентних конденсаційних покриттів. Даний метод дозволив цілеспрямовано керувати процесом осадженням іонів багатокомпонентної плазми на металеву поверхню, тобто регулювати процесом синтезу захисних покриттів на поверхні виробу [13].

Також перспективним напрямком захисту металевих виробів є синтез алюмінідних жаростійких покриттів на їх поверхні. Основним вектором розвитку даного методу є покращення властивостей покриттів за рахунок ускладнення їх хімічного складу та переходу від одношарових покриттів до багат шарових. При цьому даний метод нанесення покриттів неможливо віднести до дифузійних чи конденсаційних окремо, оскільки він включає в себе комбінацію декількох матеріалознавчих процесів.

Широкої популярності за кордоном здобув метод підвищення жаростійкості шляхом насичення поверхні конструкцій у порошкових сумішах

із покращеними властивостями [13]. Варто відмітити й інші популярні методи покращення жаростійких властивостей:

1) газотермічне осадження на поверхню порошків з багатокомпонентних сплавів [13, 14];

2) електронно-променеве осадження покриттів з парової фази [13, 14].

Можна підсумувати, що більшість сучасних методів підвищення жаростійкості металевих поверхонь, в тому числі синтез захисних покриттів, належать до дороговартісних та складних технологічних процесів [13].

1.3.1 Захисні покриття Al_2O_3 , Si_3N_4

Оксид алюмінію – неорганічна сполука алюмінію з киснем стехіометричного складу Al_2O_3 . Має температуру плавлення 2044°C . Не взаємодіє з водою, практично не розчиняється кислотами, має високу корозійну стійкість. У промисловості використовується для захисту металів від корозії, виготовлення кераміки та інших цілей [15]. До прикладу, в роботі [16] досліджували можливість осадження титану на керамічну підкладку Al_2O_3 із розплаву солі титану. Встановлено, що отримані покриття володіють гарною адгезією, а товщина покриття лінійно залежить від часу та температури нанесення. Робота [17] присвячена виготовленню композитних матеріалів Al/Mg/Cu/Ti армованих частинками Al_2O_3 за допомогою порошкової металургії. З'ясовано, що збільшення вмісту частинок оксиду алюмінію до 15 % (масових) приводить до пікового підвищення мікротвердості та покращення механічних властивостей. Також встановлено рівномірний розподіл частинок Al_2O_3 в композитах на основі Al та Cu . Схожі результати отримані в роботі [18], в якій досліджено можливість покращення механічних властивостей композиту, отриманого методом гарячого пресування Cr_2O_3 , Al та Ti . Дійсно, введення частинок оксиду алюмінію приводить до значного підвищення мікротвердості та зносостійкості даного композиту.

Нітрид кремнію – бінарна неорганічна хімічна сполука кремнію та азоту Si_3N_4 . Існує декілька модифікацій в природі. Найпоширеніші з них – $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ [15, 19]. В основному використовується для підвищення зносостійкості агрегатів та деталей конструкцій. Також матеріали на основі Si_3N_4 набувають популярності до застосування в хімічному машинобудуванні, турбобудуванні та електроніці, завдяки високому рівню механічних та фізико-хімічних властивостей. Варто відмітити, що найперспективнішим вектором застосування Si_3N_4 є високотемпературне машинобудування. Прогнозується, що більш глибокі дослідження та покращення властивостей нітриду кремнію приведе до створення жаростійких та жароміцних матеріалів, котрі зможуть працювати за температур $\sim 2000\text{ }^\circ\text{C}$ [19]. Загалом нітрид кремнію може використовуватися як допоміжний матеріал при створенні композитних матеріалів, до прикладу, в роботі [20] створено композитний матеріал на основі AgCuTi збагачений нано-частинками Si_3N_4 . Даний матеріал застосовували для нанесення кераміки та створення зварних з'єднань.

Робота [21] присвячена проблемам виникнення оксидних плівок титану із поганою адгезією при виготовленні зубних протезів, для запобігання цьому явищу було проведено нанесення покриття нітриду кремнію на поверхню титану методом імплантації. Встановлено, що дане покриття слугує бар'єром дифузії кисню в титанову матрицю, що суттєво поліпшує процес з'єднання титану та кераміки.

В таблиці 1.3 наведено значення механічних властивостей поширених матеріалів у галузі нанесення захисних покриттів.

Таблиця 1.3 – Механічні властивості поширених матеріалів, що використовуються при нанесенні захисних покриттів [22-25]

Матеріал	HV, ГПа	K_{1C} , МПа/м ^{1/2}
Al ₂ O ₃	~ 20	2,8 – 3,9
α -Si ₃ N ₄	~ 15	4,9 – 5,5
β -Si ₃ N ₄	~ 14	5,4 – 6,1

Механічні властивості даних матеріалів залежать від методу отримання, однак, порошки такого складу мають низьку тріщиностійкість, тому можна очікувати їх значного подрібнення в процесі інтенсивної деформації, а також високої зносостійкості зважаючи на високі значення мікротвердості.

1.4 Ультразвукова ударна обробка

Методи ультразвукової ударної обробки (УЗУО) належать до методів інтенсивної пластичної деформації під впливом механічних контактних впливів із частотою коливань понад 20000 Гц [26, 27].

Зазвичай методи УЗУО застосовуються для покращення комплексу властивостей зварних з'єднань та зміцнення частин конструкцій, що відіграють роль концентраторів напружень. Загалом дослідження впливу ультразвуку великої інтенсивності розпочалося ще в 70-х роках минулого століття [26]. З кожним роком ультразвукова обробка відкривала ряд перспектив у застосуванні. Така популярність даної обробки пояснюється багатократним ударним навантаженням поверхні оброблюваної деталі, внаслідок якого відбуваються процеси інтенсивного деформування та наклепу, що викликають суттєве зміцнення матеріалу та перебігу на її поверхні різноманітних фізичних явищ, наприклад, істотного підвищення рухливості атомів, тобто процесів аномального масопереносу [26, 27].

Внаслідок великої кількості експериментів та досліджень УЗУО було виявлено ряд переваг для зміцнення конструкцій та агрегатів [26]:

- 1) висока швидкість та легкість застосування;
- 2) можливість обробки конструкцій у важкодоступних місцях та деталей складної форми;
- 3) можливість значного подрібнення зерен, що можна використати при створенні деталей із високим рівнем поверхневого або об'ємного наклепу.

При всіх перевагах УЗУО дозволяє отримати вироби із підвищеним запасом міцності до декількох разів, внаслідок оптимального розподілу внутрішніх напружень по ньому. Дане явище використовується для збільшення ресурсу деталей (до 10 разів) високої відповідальності, котрі працюють в умовах високих та знакозмінних навантажень [26, 27]. Це підтверджено в роботі [26], в якій встановлено, що УЗУО приводить до інтенсивної деформації поверхневого шару, значного подрібнення зеренної структури та перерозподілу внутрішніх напружень матеріалу.

В роботі [28] досліджено вплив ультразвукової обробки на структурно-фазові процеси, які протікають при синтезі газотермічних покриттів системи Ni-Cr-B-C-Si, а саме вивчення ультразвукового впливу у процесі оплавлення покриттів та дослідження впливу ультразвукової ударної обробки на структуру і властивості зварних з'єднань сталей. Основні результати досліджень [28, 29]:

- 1) суттєве підвищення мікротвердості завдяки ультразвуковому впливі при оплавленні покриттів з Ni-Cr-B-Si-C;
- 2) інтенсифікація процесів масоперенесення елементів покриття до матриці, особливо вуглецю та бору;
- 3) попереднє ультразвукове ударне обробляння матриці приводить до значного підвищення міцносних та зносостійких властивостей утворених композиційних покриттів;

4) УЗУО зварних з'єднань сталей супроводжується значним подрібненням зерен у поверхневих шарах матеріалу до 6 разів та підвищенням механічних властивостей;

5) також процес УЗУО характеризується перерозподілом розтягуючих напружень значенням 150 МПа на стискаючі – 50 МПа.

Як було вказано раніше метод ультразвукової ударної обробки характеризується безпосередньою взаємодією поверхні виробу із контактною частиною приладу. При цьому відбувається інтенсивний наклеп і деформація поверхні оброблюваного матеріалу та її розігрів (залежить від часу обробки). При цьому спостерігаються процеси подрібнення зерен та інтенсивного окислення у випадку Ti. Саме виникнення цих явищ наштовхнуло науковців працювати у напрямку досліджень УЗУО в насичуючих середовищах, до прикладу, в роботі [27] досліджено вплив ультразвукової ударної обробки на структуру та властивості поверхневого шару титанового сплаву BT1-0 в субмікрокристалічному стані. Виявлено, що УЗУО приводить до підвищення рівня механічних властивостей, особливо міцності та зносостійкості поверхневих шарів титанового сплаву. Також в даній роботі досліджено вплив ультразвукової ударної обробки у різних насичуючих середовищах: аргону, кисню та азоту. За допомогою сучасних матеріалознавчих методів досліджень встановлено, що при обробці в середовищі кисню відбувається насичення поверхневого шару атомами кисню (до 40 ат. %), та атомами N (до 21 ат. %) при обробці в рідкому азоті, що свідчить про механохімічний синтез нітридів та оксинітридів титану за допомогою УЗУО. Наведені дані по вимірюванню мікротвердості титанового сплаву BT1-0 після обробки в аргоні показують зростання останньої до 3 разів та 3,5 разів – в рідкому азоті [27].

В роботі [26] досліджено вплив УЗУО в різних насичуючих середовищах на фазовий склад, структуру та механічні властивості поверхневих шарів алюмінієвого сплаву Д16. Основні результати досліджень засвідчили, що УЗУО в інертних середовищах аргону чи гелію приводить до модифікації

дислокаційної структури та значного подрібнення зерен у поверхневих шарах, навіть наноструктуризації, та інтенсифікації дифузійних процесів у металеву матрицю, що в свою чергу, підвищує значення величини мікротвердості до 2,5 разів та покращення зносостійкості. Аналогічні результати отримані при обробці у середовищі рідкого азоту (відбувається підвищення мікротвердості до 5 разів порівняно із вихідним станом сплаву Д16). Вцілому доведено можливість синтезу композитних покриттів із підвищеним ресурсом роботи в умовах тертя та покращеними механічними властивостями [26].

Робота [30] присвячена дослідженню впливу УЗУО цирконієвих біосумісних стопів на корозійну стійкість та опір до пластичного деформування. Основні результати дослідження:

- 1) УЗУО приводить до значного подрібнення зерен, тобто утворення нанорозмірної структури;
- 2) спостерігається зростання опору до пластичних деформацій (внаслідок наклепу) та підвищення корозійної стійкості.

Ультразвукова ударна обробка також використовується в поєднанні з іншими методами покращення властивостей матеріалу, до прикладу, робота [31] присвячена дослідженню впливу лазерної термообробки в поєднанні із УЗУО на міцнісні характеристики інструментальної сталі AISI D2. Встановлено, що комбінована обробка приводить до формування ультратонкодисперсної структури розміром $\sim 80 \text{ нм} - 250 \text{ нм}$ з границями зерен зафіксованими дрібними вторинними карбідами розміром близько 20 нм. Така структура модифікованих шарів дозволяє підвищити значення мікротвердості та зносостійкості до 2 разів – 4 разів, а отже збільшити ресурс роботи агрегату. Варто додати, що лише комбінація лазерної термообробки та УЗУО приводить до суттєвого покращення механічних властивостей.

В роботі [32] проведено дослідження можливості армування сплаву Al-6Mg частинками квазікристалічного сплаву $\text{Al}_{63}\text{Cu}_{25}\text{Fe}_{12}$ за допомогою процесу ультразвукової ударної обробки. Показано, що на глибині до 40 мкм

спостерігаються однорідно розподілені армуючі частинки. Зроблено висновок про підвищення міцнісних характеристик сплаву Al-6Mg, а саме зносостійкості приповерхневих шарів внаслідок армування за допомогою УЗУО.

Нами запропоновано гіпотезу, що ультразвукова ударна обробка із застосуванням порошків оксидів та нітридів (Al_2O_3 , Si_3N_4) приводить до синтезу відповідних захисних покриттів, що підвищують жаростійкі, корозійні та зносостійкі властивості матеріалу за певних робочих умов.

1.5 Висновки до розділу 1

1. Серед відомих жаростійких сплавів дуже перспективними є титанові сплави, до переваг яких можна віднести високу технологічність, низьку густину, відмінну довговічність та велику питому міцність. Окрім того, титан та його сплави мають добру зварюваність, що має важливе значення у багатьох галузях промисловості. До основних галузей промисловості в яких застосовується титан та його сплави, належать хімічний, машинобудівний, а також авіаційний сектори.

2. Сплав ВТ6 є найпоширенішим титановим сплавом. Використовується як матеріал для статичних і обертових компонентів газотурбінних двигунів. Недоліком даного сплаву є досить низька жаростійкість (до 450°C). Це і є основною проблемою його застосування, адже для газотурбінних двигунів необхідні матеріали із дуже високою робочою температурою.

3. Нанесення захисних покриттів методом ультразвукової ударної обробки є досить перспективним напрямком покращення комплексу жаростійких, корозійних та зносостійких властивостей легких конструкційних сплавів, у тому числі на основі титану, до яких належить обраний для дослідження сплав ВТ6.

2 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Використані матеріали

Досліджувані зразки одержано шляхом різання катаних прутків титанового сплаву ВТ6 на циліндри діаметром 13 мм та висотою 5 мм, а також подальшим формуванням покриттів із додаванням у зону ультразвукової ударної обробки порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. В табл. 2.1 наведено механічні характеристики використаних матеріалів.

Таблиця 2.1 – Механічні властивості використаних матеріалів [22-25]

Матеріал	Мікро- твердість HV, ГПа	Коеф. тріщино- стійкості K_{IC} , МПа/м ^{1/2}	Параметри гратки, Å		Коефіцієнт термічного розширення, (10 ⁻⁶) до 100 °С, К ⁻¹	Тип гратки
			а	с		
Al_2O_3	~ 20	2,8 – 3,9	4,758	12,99	8,5	тригональна
$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$	~ 15	4,9 – 5,5	7,765	5,62	3,4	тригональна
$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$	~ 14	5,4 – 6,1	7,606	2,91	3,4	гексагональна
ВТ6	2,9	300	2,96	4,7	8,4	гексагональна щільнопакована

Проведено електронно-мікроскопічні дослідження вихідного стану порошків, визначено їх розмір та форму. На рис. 2.1 показано електронно-мікроскопічні зображення порошку Al_2O_3 .

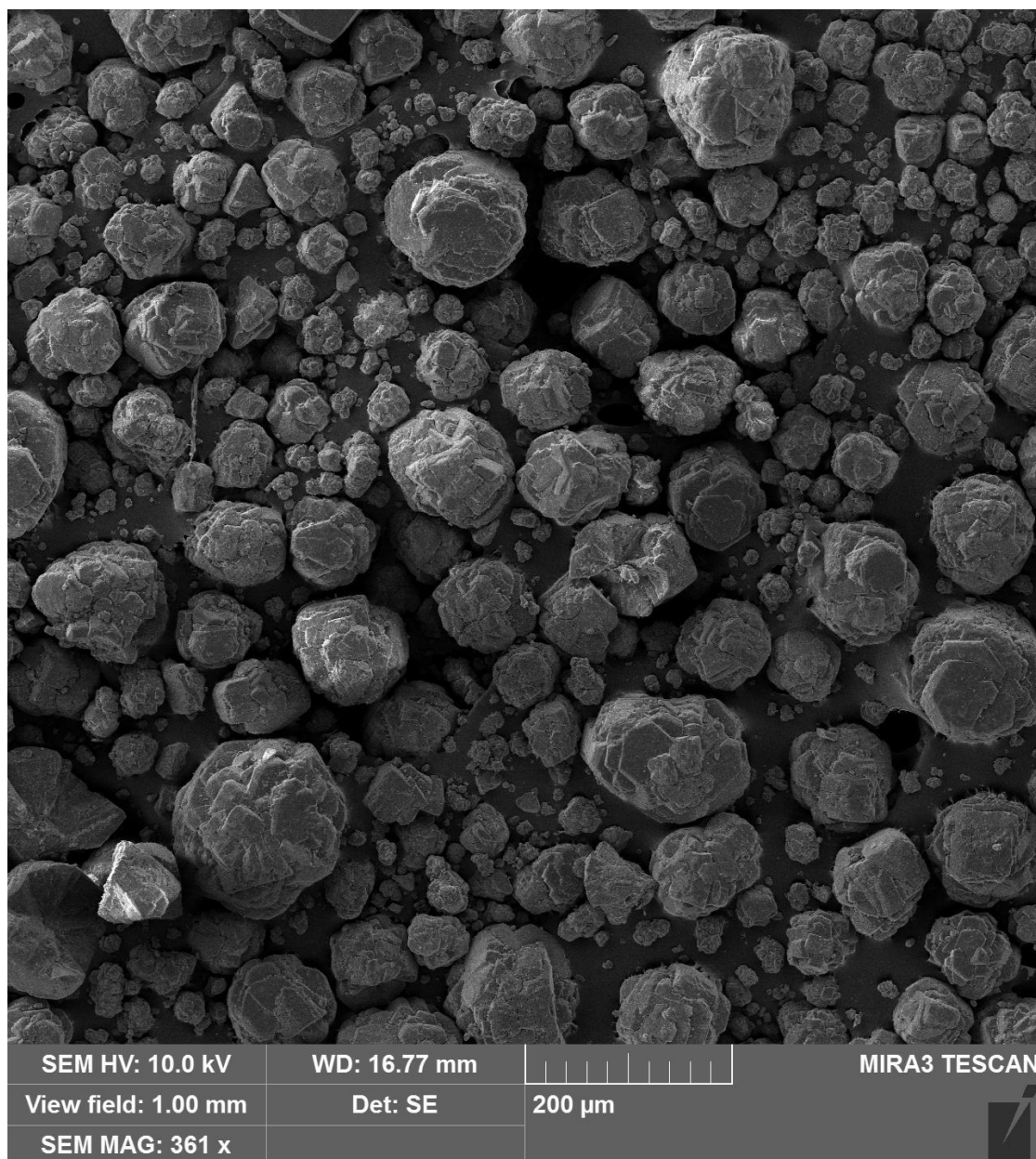
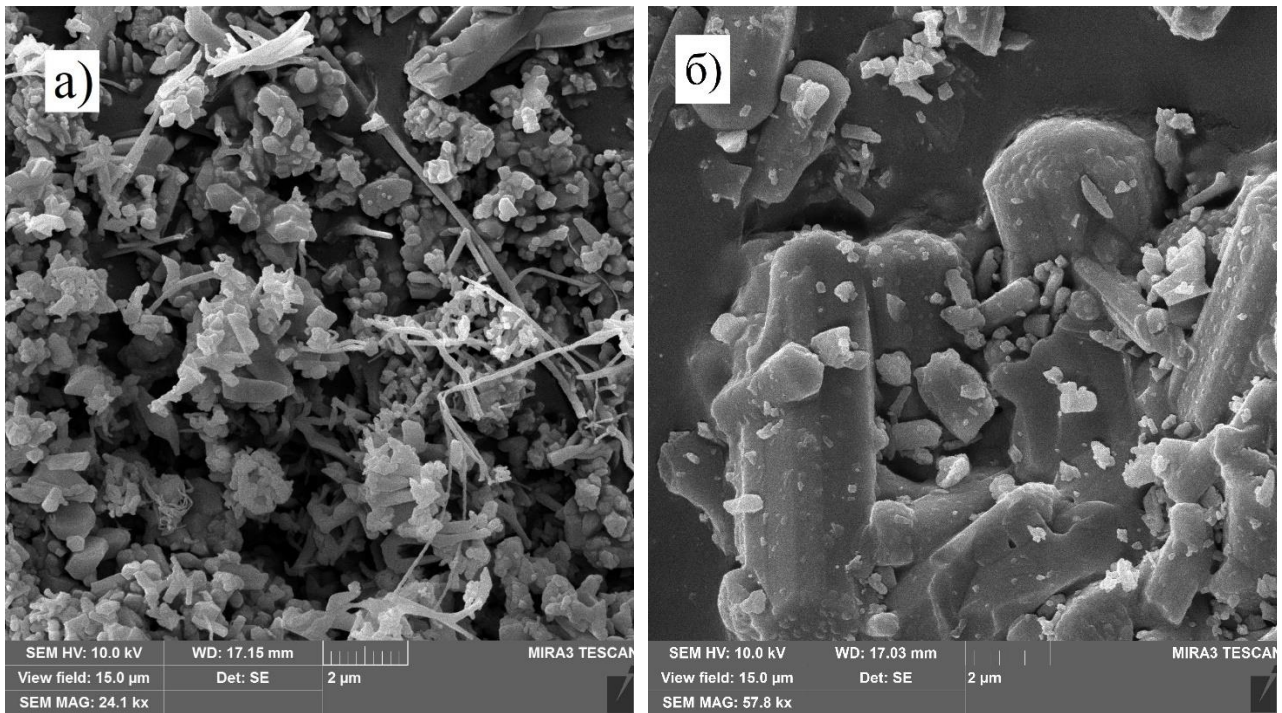


Рисунок 2.1 – Електронно-мікроскопічні зображення порошку Al_2O_3

З рисунку видно, що розмір вихідних порошочок оксиду алюмінію змінюється від десятків мікрон до ~ 150 мкм.

На рис. 2.2 показано електронно-мікроскопічні зображення порошку α - Si_3N_4 та β - Si_3N_4 .



а) порошок α - Si_3N_4 у вихідному стані, б) β - Si_3N_4 у вихідному стані

Рисунок 2.2 – Електронно-мікроскопічні зображення використаних порошків

Можна бачити, що порошок α - Si_3N_4 характеризується меншим розкидом по фракціях, розмір порошинок змінюється від сотень нанометрів до ~ 4 мкм – 5 мкм. У випадку β - Si_3N_4 спостерігається зміна розміру порошинок в діапазоні від сотень нанометрів до десятків мікрон.

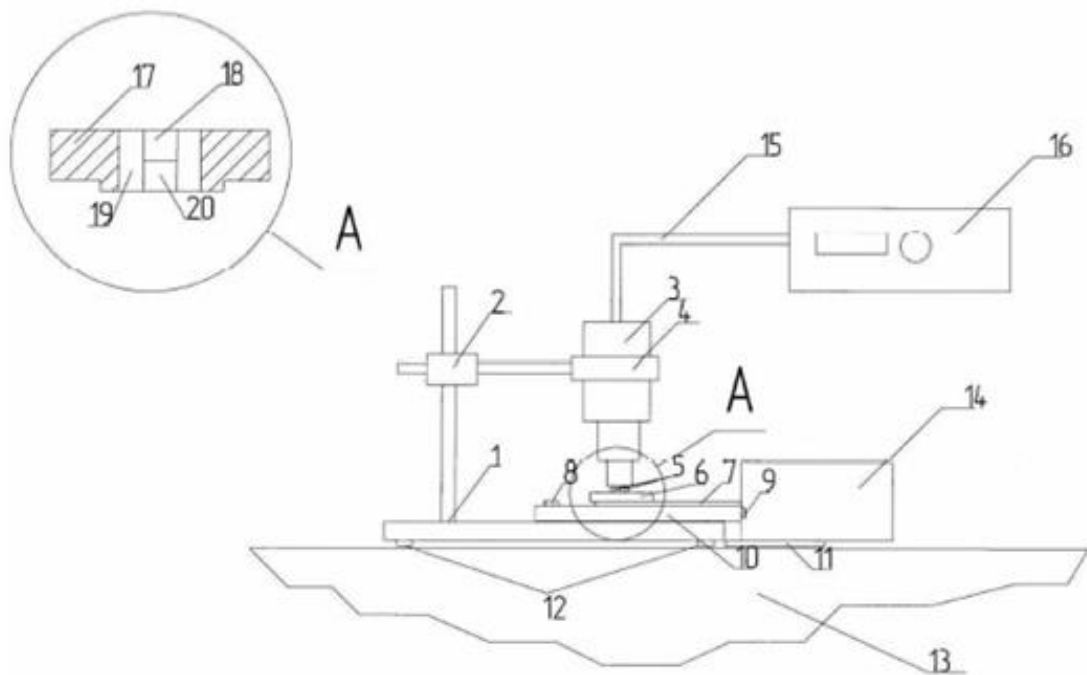
2.2 Технологія нанесення покриттів

Відповідно до проведених раніше експериментів, у роботі дещо модифіковано спосіб синтезу композиційних покриттів за допомогою ультразвукової ударної обробки поверхні титанового сплаву ВТ6.

Синтез покриттів проводився на приладі УЗГ–300 (рис. 2.3). Даний прилад складається із генератора ультразвукових коливань із наступними характеристиками (потужність $\sim 0,6$ кВт та частота коливань ~ 21 кГц) та механізму передачі коливань (вібратор зі ступінчастим концентратором) на

якому розміщено ударну головку з циліндричним бойком діаметром 14 мм та довжиною 18 мм, що безпосередньо контактує із оброблюваною поверхнею [26, 29].

В даній роботі за допомогою методу ультразвукової ударної обробки проводився синтез захисних покриттів (Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$) на поверхні титанового сплаву ВТ6.



1 – основа, 2 – елемент кріплення кронштейна, 3 – ультразвуковий перетворювач (УЗП), 4 – кільце для кріплення УЗП, 5 – бойок, 6, 17 – шайби з отворами для зразків, 7 – сполучна деталь блоку зразків з низькочастотним вібратором (НЧВ), 8, 9 – кріпильні болти, 10 – масивна плита, 11 – гумова підкладка, 12 – опорні елементи основи установки, 13 – робочий стіл, 14 – НЧВ, 15 – сполучний кабель живлення УЗП, 16 – ультразвуковий генератор, 18 – оброблюваний зразок, 19 – металеве кільце-вставка, 20 – підкладинка під зразок

Рисунок 2.3 – Установа для проведення ультразвукової ударної обробки [26]

Тривалість обробки зразка – 2,5 хв з кожного боку в дискретному режимі, тобто 5 циклів обробки тривалістю 30 с із повторною подачею порошку до зони обробки.

2.3 Методики дослідження

В роботі використано комплекс сучасних експериментальних методів фізичного матеріалознавства – рентгеноструктурний, електронно-мікроскопічний та гравіметричний аналізи, які мають забезпечити отримання достовірної інформації щодо закономірностей формування захисних покриттів, а також зносостійкі та корозійні дослідження для визначення механічних та корозійних властивостей синтезованих покриттів.

2.3.1 Растрова електронна мікроскопія

Растровий електронний мікроскоп (РЕМ) – ряд приладів, який зазнав широкого використання в матеріалознавстві за рахунок ряду переваг порівняно із оптичними мікроскопами, які протягом довгого періоду займали провідне місце в матеріалознавстві [33]. Найголовнішими перевагами РЕМ є: велика величина різкості зображення, що дозволяє уникнути процедури виготовлення шліфів (у випадку оптичної мікроскопії є обов'язковим), а також досліджувати об'єкти із шорсткою та рельєфною поверхнею, отримання зображень із кращим збільшенням (сучасні оптичні мікроскопи до 2000 крат) близько 1000000 крат та високою роздільністю порядку 10 нм, а у кращих лабораторних приладів – 2,5 нм. Також однією з переваг РЕМ є можливість отримання більш чітких, об'ємних та контрастних зображень [33-36].

Основна відмінність в роботі РЕМ та оптичного мікроскопа це використання первинного електронного пучка, який при потраплянні на зразок приводить до появи в зоні взаємодії ряду джерел інформації, наприклад,

характеристичного рентгенівського випромінювання, оже-електронів, вторинних та розсіяних електронів, фотонів та катодолюменісценції. Ці джерела дають інші корисні дані, наприклад, про склад поверхневих шарів та інше [33, 36].

Зовнішній вигляд растрового електронного мікроскопа РЕМ 106 на якому було проведено дослідження поперечних перерізів зразків та визначення товщин синтезованих покриттів, а також його блок-схему наведено на рисунках 2.4 та 2.6.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд мікроскопа РЕМ 106 [36]

На рисунку 2.5 наведено зовнішній вигляд растрового електронного мікроскопа Mira 3 на якому було проведено дослідження поверхні дослідних зразків, доріжок тертя та вихідних порошків, які застосовувалися для синтезу покриттів.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд мікроскопа РЕМ Mira 3 [37]

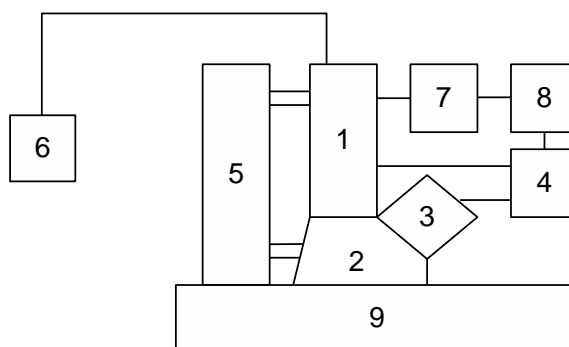


Рисунок 2.6 – Блок-схема растрового мікроскопа РЕМ 106 [36]

Прилад складається з наступних блоків: електронно-оптичної системи (1), камери для розміщення об'єкта (2), детекторної системи (3), блока побудови зображення (4), системи для отримання вакууму (5), високовольтного генератора (6), блоків живлення магнітних лінз (7) та системи керування приладом (8) та основи для розміщення приладу (9) [36].

2.3.2 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Рентгеноструктурний фазовий аналіз проводився на дифрактометрі Rigaku Ultima IV з використанням сцинтиляційного лічильника у випромінюванні $\lambda_{\text{K}\alpha}$ -Cu. Дифрактометричні дослідження проведено за схемою фокусування (у геометрії) за Брегом-Брентано [38].

Умовою дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці є рівняння Вульфа–Бреггів:

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (2.1)$$

де d – міжплощинна відстань даної фази, Å;

θ – кут дифракції рентгенівського променя від певної системи атомних площин;

λ – довжина хвилі випромінювання монохроматичних рентгенівських променів, що падають на кристал, Å;

n – порядок дифракційного максимуму.

Загалом, основна мета якісного рентгенофазового аналізу полягає у детектуванні та виявленні певних фаз, без встановлення їх кількісного вмісту. Варто доповнити, що кожне кристалічне з'єднання має притаманну лише йому структуру, яка характеризується симетрією, параметрами ґратки, а також просторовим розподілом атомів в елементарній комірці [39]. Це в свою чергу обумовлює наступне твердження, що кожне унікальне з'єднання (фаза) характеризується власною дифрактограмою, тобто появою притаманних лише йому рефлексів. Стосовно складних речовин, які складаються із великої кількості різних фаз, то дифрактограми від таких речовин являтимуться результатом накладання дифрактограм від кожної простої речовини [39]. В результаті порівняння положень рефлексів на досліджуваних дифрактограмах та їх

інтенсивності із даними зі спеціальних баз (або еталонами) можна визначити/встановити присутність певної фази в речовині [39].

Методи кількісного фазового аналізу використовуються для визначення кількісного вмісту певної фази в суміші. Як було сказано раніше, кожна фаза має свій притаманний лише йому набір дифракційних максимумів, який не залежить від наявності інших фаз. При чому інтенсивність цих рефлексів пропорційна вмісту фази в речовині [39].

Існує декілька найпоширеніших методів, які застосовуються для визначення кількісного складу суміші:

- 1) порівняння між собою інтенсивності ліній різних фаз, присутніх на дифрактограмі.
- 2) порівняння інтенсивності різних фаз з інтенсивностями ліній отриманих від еталона.

Інтегральна інтенсивність рефлексу I_{hkl} визначається за формулою [38]:

$$I_{hkl} = CL(\theta)/F_{hkl}^2 P_{hkl} e^{-2M} A(\theta), \quad (2.2)$$

де C – множник, що залежить від довжини хвилі випромінювання;

$|F_{hkl}|^2$ – структурний фактор;

P_{hkl} – чинник повторюваності, який враховує наявність еквівалентних площин, із однаковими дифракційними лініями;

e^{-2M} – температурний чинник;

$A(\theta)$ – чинник поглинання (залежить від природи речовини, довжини хвилі випромінювання, а також методу зйомки).

Загалом на інтенсивність рефлекса також може впливати коефіцієнт поглинання матеріалу речовини, а не лише концентрація цієї фази в речовині [39].

Інтенсивність рефлексу також залежить, окрім вказаних вище чинників, від режиму роботи рентгенівського апарату, а саме струму, що проходить через

трубку; напруги, що подається на трубку; розміру щілин, що обмежують рентгенівський промінь, режиму роботи лічильника квантів рентгенівського випромінювання [38].

2.3.3 Гравіметричний аналіз

Жаростійкі властивості титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки в присутності порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ досліджували за допомогою гравіметричного аналізу. Суть якого полягає в наступному, зразки перед термічною обробкою промивали, висушували та зважували на аналітичних вагах, після чого проводилася термічна обробка на повітрі за температури $650\text{ }^\circ\text{C}$ тривалістю 50 годин в режимі термоциклювання (нагрів до температури $650\text{ }^\circ\text{C}$ – витримка 5 годин – охолодження) та подальше зважування. Саме порівняння мас зразків протягом усього процесу відпалу та спостереження динаміки зміни маси свідить про зміну жаростійких властивостей титанового сплаву ВТ6 та доцільності застосування УЗУО для синтезу захисних покриттів, що працюють за підвищених температур у відповідальних вузлах агрегатів.

2.3.4 Корозійні дослідження

Для встановлення рівня корозійних властивостей титанового сплаву ВТ6 та їх зміни внаслідок проведення ультразвукової ударної обробки із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, а також термічного впливу було проведено додаткові корозійні дослідження за трьохелектродною схемою (рис. 2.7).

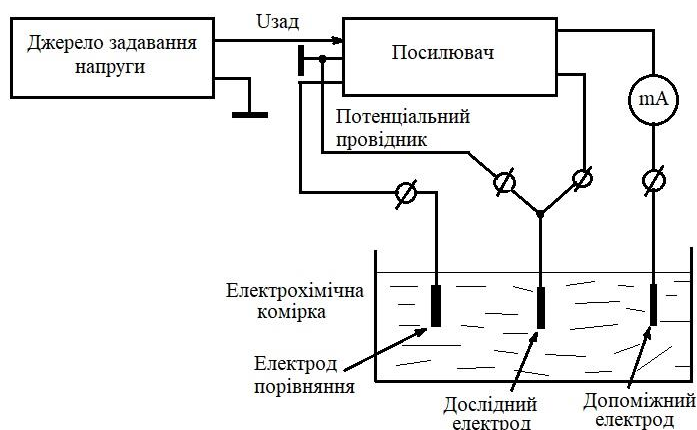


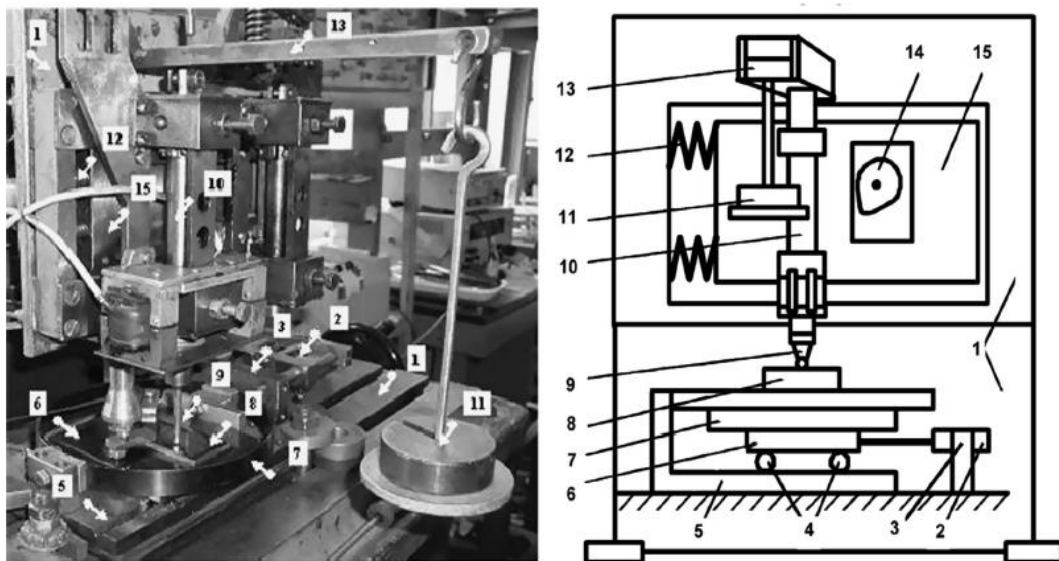
Рисунок 2.7 – Схема установки для корозійних досліджень

Принцип роботи даної установки полягає в тому, що потенціостат підтримує потенціал (поляризуючий струм) електрода, що досліджується на заданому рівні, незалежно від змін, що протікають в електрохімічній комірці. Підтримка потенціалу здійснюється за рахунок зміни величини струму поляризації [40]. Разом із потенціостатом використовуються електрохімічні комірки, які в свою чергу складаються із електродів робочого порівняння (по відношенню до них вимірюють потенціал робочого електрода), а також із допоміжного електрода для утворення робочого ланцюга через який відбувається проходження струму поляризації [40]. Із аналізу робочої схеми витікає, що на один із входів посилювача подають напруження задавання, а на інший різницю потенціалів між електродами порівняння та дослідження. Вхідні напруження, що надходять в посилювач порівнюють, отримана різниця потенціалів використовується для керування вихідним струмом, за рахунок якого відбувається поляризація електрода, що досліджується до рівня встановленого на джерелі напруги задавання [40].

2.3.5 Випробування на зношування

Зносостійкість зразка після УЗУО та подальшого термічного впливу досліджувалася за допомогою трибологічного комплексу АТКД (рис. 2.6), що був розроблений та розташований в Інституті проблем матеріалознавства ім. Францевича [32, 41, 42]. Випробування на зношення виконувалися у середовищі неактивного рідкого парафіну за допомогою сферичного індентора виготовленого із оксиду алюмінію (діаметром 8 мм та твердістю 15,5 ГПа) у вигляді доріжки тертя довжиною 4 мм. Тривалість випробувань складала 20 хвилин, навантаження 20 Н, частота зворотно-поступального руху індентора складала 1 Гц та швидкість його ковзання – 0,013 м/с.

На рис. 2.8 наведено зовнішній вигляд та принципову схему трибологічного комплексу АТКД.



1 – корпус, 2 – перетворювач, 3 – затискач, 4 – дві пари кульок, 5 – стійка ковзання, 6 – опора, 7 – кільцева пружина, 8 – зразок, 9 – індентор, 10 – головний циліндр, 11 – набір ваг, 12 – набір пружин, 13 – важіль, 14 – кулачковий механізм

Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд та схема трибологічного комплексу АТКД [41]

Варто додати, що випробування виконували в статичному та динамічному режимах. Величина зносостійкості визначалася за рахунок аналізу глибини доріжок зношення, які вимірювалися за допомогою приладу Р-201-профілограф-профілометр.

2.4 Висновки до розділу 2

1. Як об'єкт дослідження використано титановий сплав ВТ6 та синтезовані на його поверхні композитні покриття на основі оксиду алюмінію та нітридів кремнію різних модифікацій (Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$).

2. Обрано комплекс сучасних експериментальних методів фізичного матеріалознавства — рентгеноструктурний, електронно-мікроскопічний та гравіметричний аналізи, а також випробування на зносо- та корозійну стійкість, що має забезпечити отримання достовірної інформації про закономірності синтезу захисних покриттів та їх властивостей.

3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Жаростійкі властивості сплаву ВТ6 після синтезу композитних покриттів методом ультразвукової ударної обробки із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$

Дослідження впливу ультразвукової ударної обробки із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ на жаростійкі властивості титанового сплаву ВТ6 у вихідному стані та після синтезу покриттів проведено за допомогою термічної обробки в режимі термоциклювання на повітрі за температури $650\text{ }^\circ\text{C}$ і подальших гравіметричних досліджень. Швидкість нагріву становила $9\text{ }^\circ\text{C}$ за хвилину, а тривалість відпалу – 50 годин. Відпал проводився в режимі термоциклювання, тобто нагрів – витримка 5 годин при температурі $650\text{ }^\circ\text{C}$ – охолодження. Зовнішній вигляд устаткування для термічного відпалу наведено на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Установка для термічної обробки зразків

Результати гравіметричних досліджень титанового сплаву ВТ6 до та після термічного впливу наведено в табл. 3.1. У даній таблиці також наведена інформація про загальний приріст маси під час окиснення та її втрату за рахунок відшарування оксидів під час охолодження. Наведені величини нормалізовано до початкової маси зразків.

Таблиця 3.1 – Результати гравіметричних досліджень (вимірювання маси) титанового сплаву ВТ6

Назва покриття	Початкова маса, г	Сумарний приріст маси, г	Сумарна втрата маси, г
ВТ6 (вихідний)	3,52	0,016	0,012
Al_2O_3	3,551	0,009	0,008
$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$	3,552	0,007	0,007
$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$	3,37	0,004	0,006

Зміна маси досліджуваних зразків в залежності від тривалості термічної обробки у графічному вигляді наведена на рис. 3.2

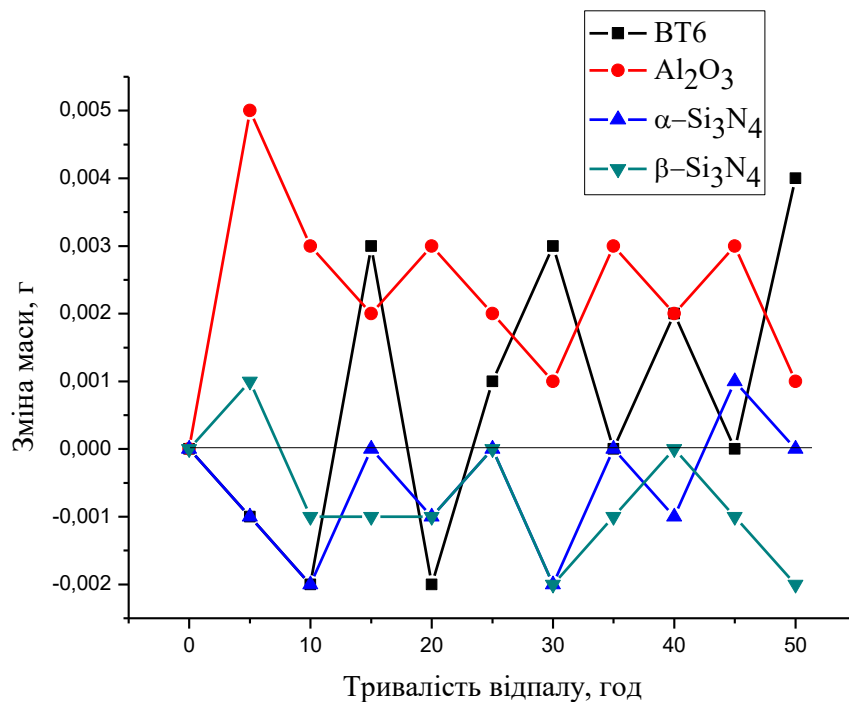


Рисунок 3.2 – Зміна маси зразків в залежності від часу витримки

Аналіз гравіметричних даних засвідчив, що для всіх зразків в процесі термічної обробки в режимі термоциклювання на повітрі спостерігається

циклічний характер зміни маси, тобто чергування приросту та втрати маси впродовж відпалу. Це може пояснюватися обраним режимом термообробки.

Даний ефект пов'язаний із появою напружень, що виникають в процесі нагрівання-охолодження зразків, пов'язаних із різницею коефіцієнтів термічного розширення складових. Ці термічні напруження можуть викликати часткове відколювання від поверхні зразків синтезованого композитного шару Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ і $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ та новоутворених оксидних плівок алюмінію та титану. Приріст маси зразків, в тому числі і вихідного, може бути пов'язаний із термічним окисненням необроблених поверхонь титанового сплаву ВТ6 та утворенням оксидних плівок алюмінію та титану. Зміна маси вихідного зразку пояснюється утворенням та подальшим відшаруванням в процесі відпалу оксиду алюмінію та титану.

Подібні залежності отримано для випадку композитних шарів з частинками $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ і $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ (рис. 3.2). Проте, на відміну від необробленого зразка ВТ6 і зразка із композитним шаром із Al_2O_3 , зареєстрована зміна маси зразків для покриттів із різними модифікаціями нітриду кремнію за умов циклічного нагрівання-охолодження значно менша.

Очевидно, що формування композитних шарів на обробленій поверхні зразка ВТ6 запобігає окисненню титанової матриці, тобто утворенню оксидів алюмінію і титану, а в процесі термічної витримки окиснення зазнає здебільшого необроблена (бічна) поверхня. Варто зазначити, що $S_{\text{необ}} = 220 \text{ мм}^2$, а $S_{\text{заг}} = 530 \text{ мм}^2$. З урахуванням цього доцільно розглянути значення зміни маси зразків, тобто різницю між приростом маси вихідного зразка ВТ6 та її втратою, віднесеної до площі двох пласких поверхонь зразків. Ці дані, що дозволяють більш конкретно оцінити жаростійкість сформованих композитних покриттів, наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Відношення зміни маси до площі зразку

Покриття	BT6, мг/мм ²	Al ₂ O ₃ , мг/мм ²	α-Si ₃ N ₄ , мг/мм ²	β-Si ₃ N ₄ , мг/мм ²
Зміна маси / S _{необ}	0,0528	0,0772	0,0636	0,0454
Зміна маси / S _{заг}	0,0528	0,0320	0,0264	0,0188

Ще одним параметром, який опосередковано характеризує довговічність матеріалу за умов високотемпературного окиснення, може бути загальна різниця між приростом маси вихідного зразка BT6 та її втратою за рахунок відлущення оксидних плівок. Для вихідного сплаву BT6 вона становить 28 мг. Для інших зразків цей показник становить: BT6 + Al₂O₃ – 17 мг, BT6 + α-Si₃N₄ – 14 мг та для BT6 + β-Si₃N₄ – 10 мг. Таким чином спостерігається суттєве покращення жаростійких властивостей титанового сплаву BT6 після ультразвукової ударної обробки із використанням порошків у декілька разів (для BT6 + Al₂O₃ – 1,6 рази, BT6 + α-Si₃N₄ – 2 рази, BT6 + β-Si₃N₄ – 2,8 рази). Ультразвукова ударна обробка поверхні із додаванням порошків дійсно запобігає окисненню титанової матриці.

Аналіз результатів гравіметричного аналізу дає підстави стверджувати, що найбільш ефективно підвищення жаростійких властивостей забезпечується внаслідок синтезу покриття, отриманого методом ультразвукової ударної обробки із використанням порошку β-Si₃N₄. Даний ефект може пояснюватися тим, що даний порошок має такий же тип ґратки як і матриця (гексагональна) та відповідністю періодів ґратки $a_{Ti} = 2,951 \text{ Å}$ та $c_{\beta-Si_3N_4} = 2,909 \text{ Å}$. Також β-Si₃N₄ має високу стійкість до теплових ударів, а отже, характеризується виникненням мінімальних термічних напружень в процесі термоциклювання. Потрібно відмітити, що термічні коефіцієнти лінійного розширення сплаву BT6 та оксиду

алюмінію Al_2O_3 є дуже близькими, що забезпечує виникнення низького рівня термічних напружень в процесі відпалу.

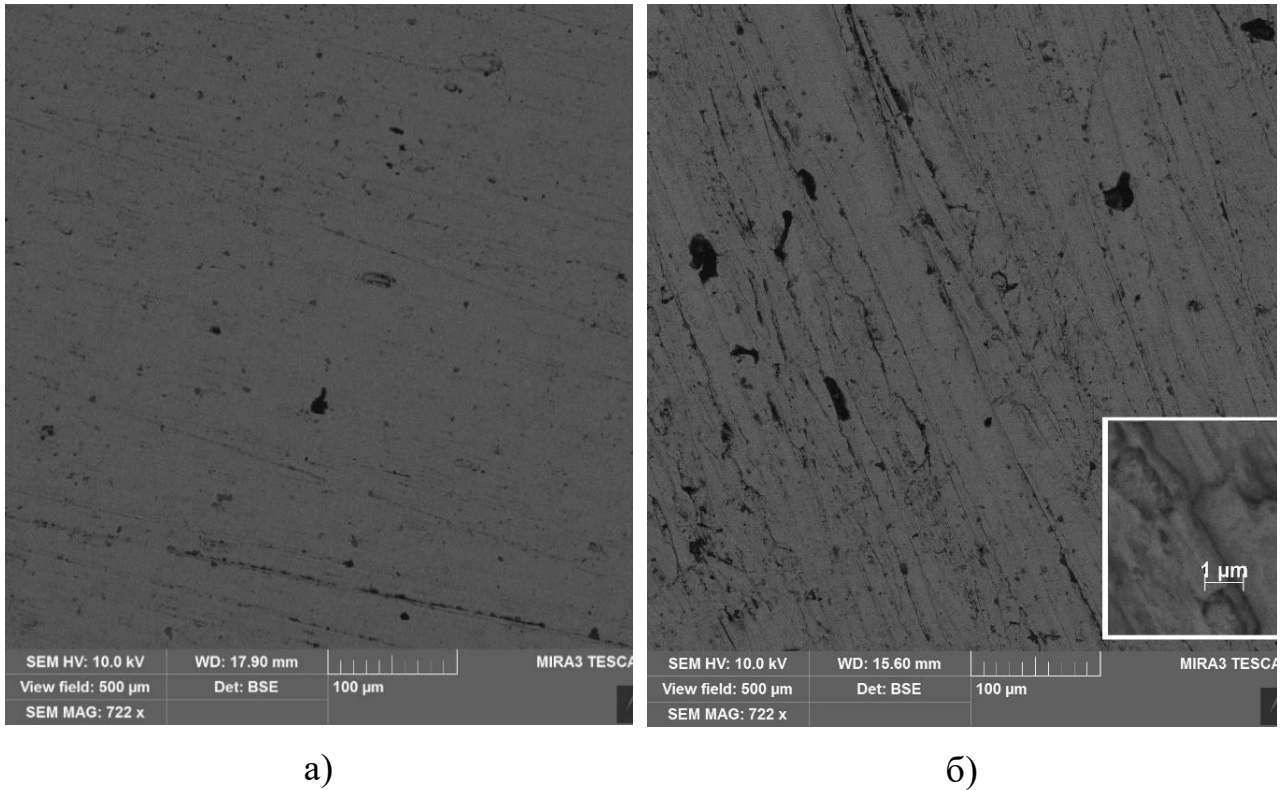
Аналіз гравіметричних досліджень зразків у вихідному стані та зразків із синтезованими покриттями доводить ефективність та доцільність використання методу ультразвукової ударної обробки задля підвищення жаростійких властивостей титанового сплаву ВТ6 – оброблені зразки характеризуються значно меншою зміною маси в порівнянні із необробленим.

3.2 Морфологія і хімічний склад поверхні сплаву ВТ6 після УЗУО та наступної термічної витримки

Після синтезу захисних покриттів оксиду алюмінію Al_2O_3 та нітриду кремнію Si_3N_4 різних модифікацій методом ультразвукової ударної обробки на поверхні титанового сплаву ВТ6 та подальшої термічної обробки в режимі термоциклювання проведено дослідження методом растрової електронної мікроскопії.

Основна мета – виявлення поверхневої мікроструктури титанового сплаву та синтезованих на його поверхні захисних покриттів, а також різного роду дефектів до та після термічної обробки. Інтерес також представляє зміна шорсткості поверхні обробленої методом УЗУО із використанням порошків та вплив на цей параметр термічної обробки у порівнянні із вихідним станом титанового стопу.

На рис. 3.3 наведено РЕМ-зображення поверхні вихідного та відпаленого зразків, які не піддавалися УЗУО.



а) у вихідному стані, б) після відпалу при температурі 650 °С

Рисунок 3.3 – Електронно-мікроскопічні зображення поверхні зразків

Можна відмітити, що на вихідному зразку після відпалу спостерігається поява шаруватих структур. Дані структури можуть бути оксидними плівками алюмінію та титану, які утворюються в процесі окиснення. Причому згідно літературних даних, такі шаруваті оксидні плівки складаються з оксидної плівки алюмінію на поверхні сплаву та плівки оксиду титану ближче до неокисненої матриці. Це може пояснюватися дифузійними процесами, які відбуваються у сплаві за підвищених температур. На рис. 3.4 наведено РЕМ-зображення поверхні зразків після УЗУО із використанням Al_2O_3 та подальшого відпалу при 650 °С.

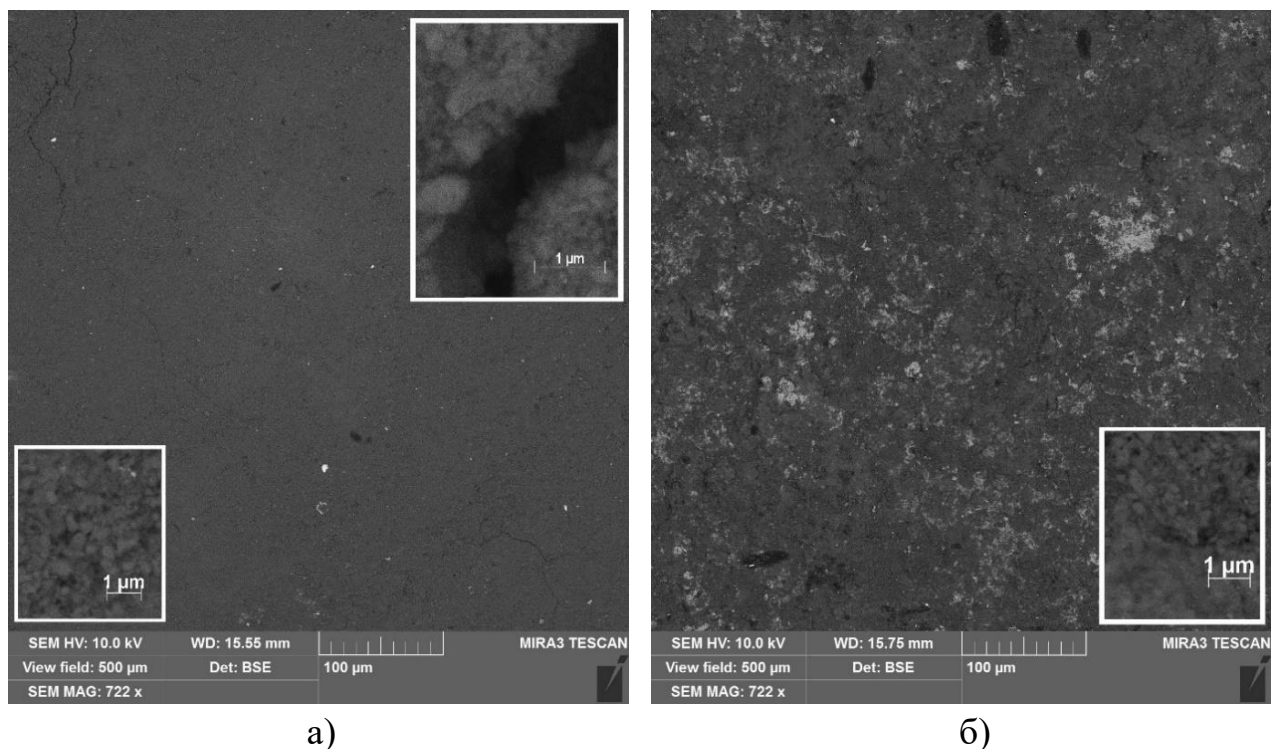
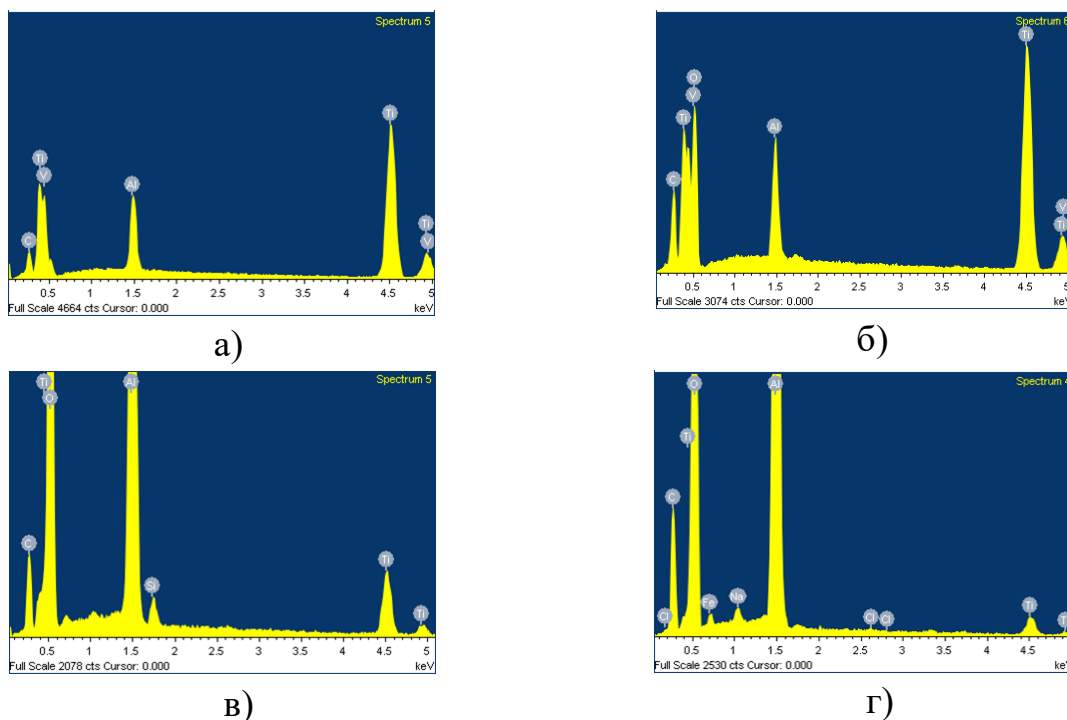


Рисунок 3.4 – Електронно-мікроскопічні зображення поверхні зразків

Аналіз поверхні зразків після УЗУО, як до, так і після відпалу свідчить про значне зростання шорсткості порівняно із необробленим зразком. Припускається, що на поверхні титанового сплаву ВТ6 утворюється покриття Al_2O_3 , причому в процесі УЗУО порошинки Al_2O_3 значно подрібнюються (внаслідок високої крихкості даного порошку) до розмірів $\sim 200\text{ нм} - 500\text{ нм}$, тому отримане покриття можна віднести до наноструктурованих. В процесі відпалу шорсткість покриття та кількість поверхневих дефектів суттєво зменшуються порівняно із невідпаленим зразком (рис. 3.4, а), що пояснюється перебігом дифузійних процесів та взаємодією синтезованого покриття з матричним сплавом за високих температур. Це підтверджується даними хімічного аналізу, що наведено на рис. 3.5.



а) у вихідному стані, б) після відпалу при 650 °С, в) після УЗУО із використанням Al_2O_3 , г) після УЗУО із використанням Al_2O_3 та подальшого відпалу при 650 °С

Рисунок 3.5 – Результати рентгеноспектрального аналізу

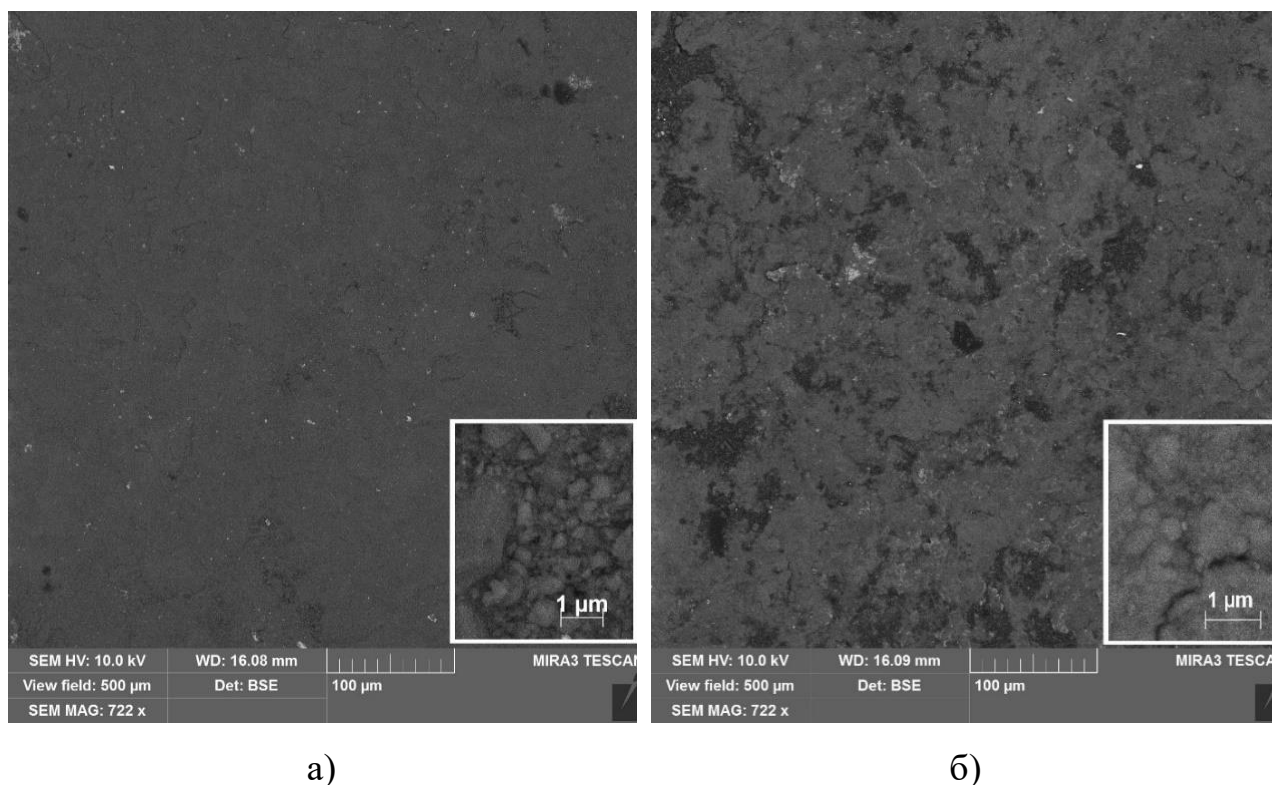
В табл. 3.3 наведено дані кількісного хімічного аналізу зразків до УЗУО та після із використанням Al_2O_3 та подальшого відпалу при 650 °С.

Таблиця 3.3 – Хімічний склад поверхневих шарів (% , мас.)

Назва/елемент	C	O	Al	Ti	V	Fe
BT6	3,65	-	5,87	85,95	4,53	-
BT6 + 650 °С	5,97	18,41	4,8	68,06	2,76	-
Al_2O_3	7,25	44,55	33,32	13,93	-	-
Al_2O_3 + 650 °С	15,24	41,7	34,89	4,91	-	2,69

Як видно із табл. 3.3, після УЗУО із використанням Al_2O_3 спостерігається значне збільшення кількості Al та O при значному зменшенні кількості

складових матричного сплаву (Ti та V), що свідчить про утворення відповідного оксидного покриття. На рис. 3.6 наведено РЕМ-зображення поверхні зразків після УЗУО із використанням α - Si_3N_4 та подальшого відпалу при 650 °С.

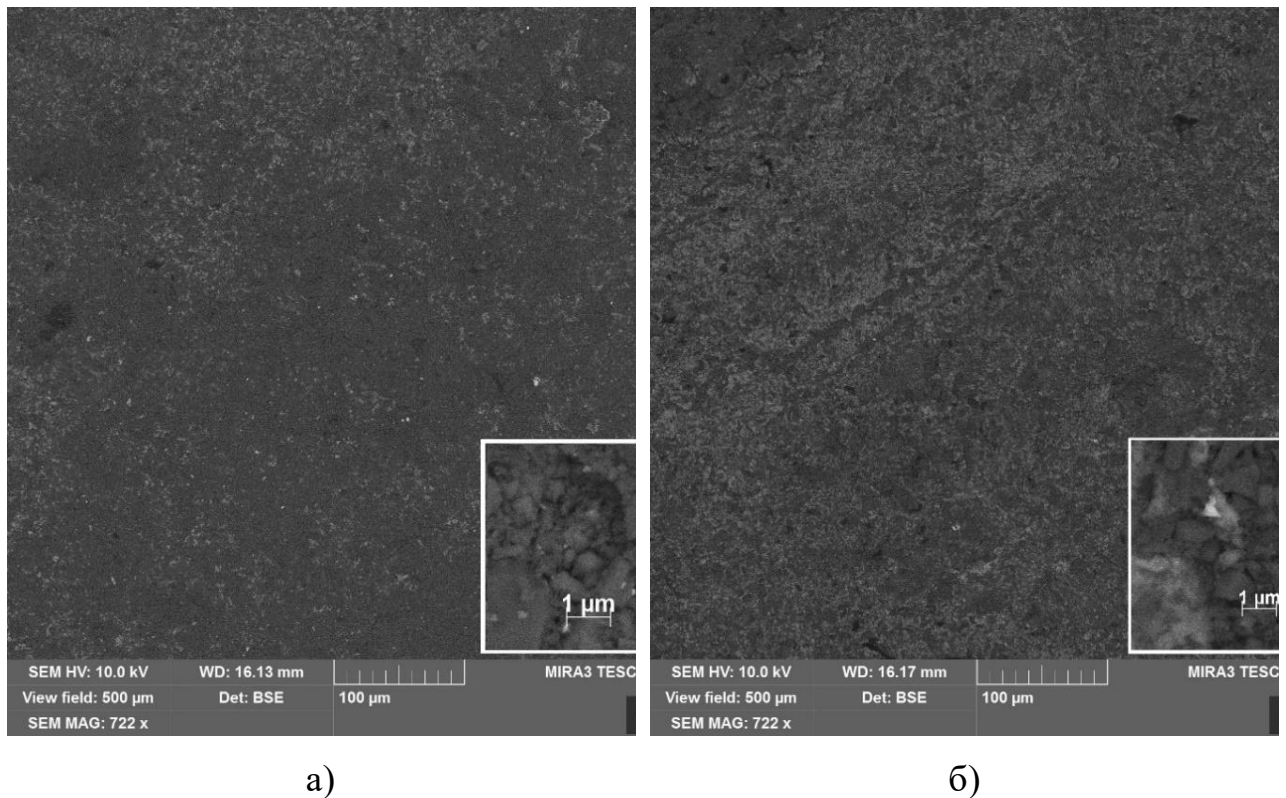


а) після УЗУО із використанням α - Si_3N_4 , б) після УЗУО із використанням α - Si_3N_4 та подальшого відпалу при температурі 650 °С

Рисунок 3.6 – Електронно-мікроскопічні зображення поверхні зразків

Після відпалу спостерігається суттєве зменшення шорсткості поверхні порівняно із невідпаленим зразком, що пояснюється перебігом дифузійних процесів та взаємодією (спіканням) синтезованого покриття та титанової матриці за високих температур (рис. 3.6). Можна припустити, що на поверхні титанового сплаву ВТ6 утворюється покриття α - Si_3N_4 , причому в процесі УЗУО порошинки α - Si_3N_4 значно подрібнюються (але не так суттєво, як у випадку Al_2O_3 , внаслідок меншої крихкості даного порошку до розмірів $\sim 0,2$ мкм – 2 мкм. Проте, виникають темні зони із підвищеною концентрацією С та О, у яких вміст азоту

значно менший (табл. 3.4). На рис. 3.7 наведено РЕМ-зображення поверхні зразків після УЗУО із використанням β - Si_3N_4 та подальшого відпалу при 650 °С.

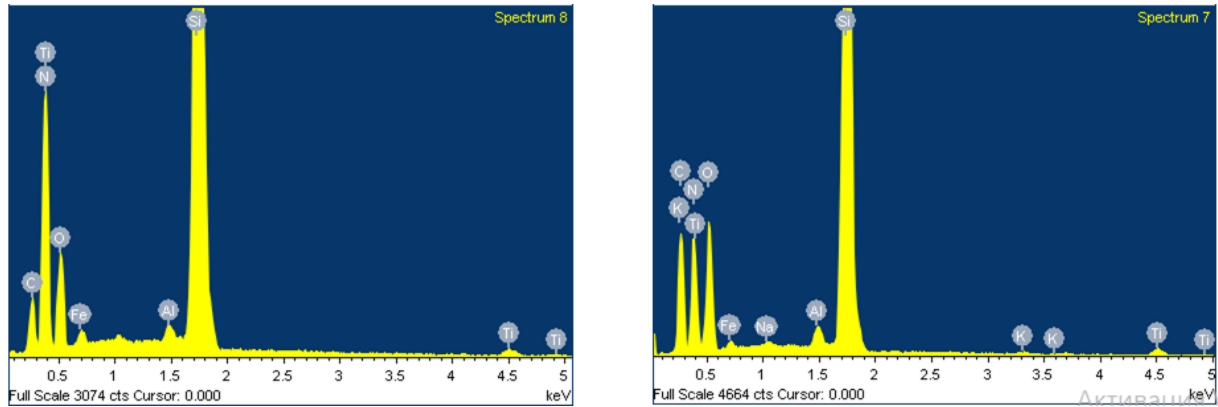


а) після УЗУО із використанням β - Si_3N_4 , б) після УЗУО із використанням β - Si_3N_4 та подальшого відпалу при температурі 650 °С

Рисунок 3.7 – Електронно-мікроскопічні зображення поверхні зразків

Аналіз наведених даних свідчить, що після відпалу спостерігається незначна зміна шорсткості зразків з покриттями β - Si_3N_4 порівняно із невідпаленим зразком, що пояснюється кращою термічною стабільністю даної сполуки та низькою схильністю до спікання за обраної температури термічної витримки. Можна припустити, що і у даному випадку на поверхні титанового сплаву ВТ6 утворюється покриття нітриду кремнію, причому в процесі УЗУО порошинки β - Si_3N_4 значно подрібнюються до розмірів $\sim 0,3$ мкм – 2,5 мкм, внаслідок їх високої крихкості. Також варто відмітити високу рівномірність даного покриття та відсутність тріщин. Наявність кремнію та азоту

підтверджується за допомогою хімічного аналізу. Спектри випромінювання зразків після ультразвукової ударної обробки із використанням порошків α - Si_3N_4 і β - Si_3N_4 та подальшої термічної витримки наведено на рис. 3.8 та 3.9.



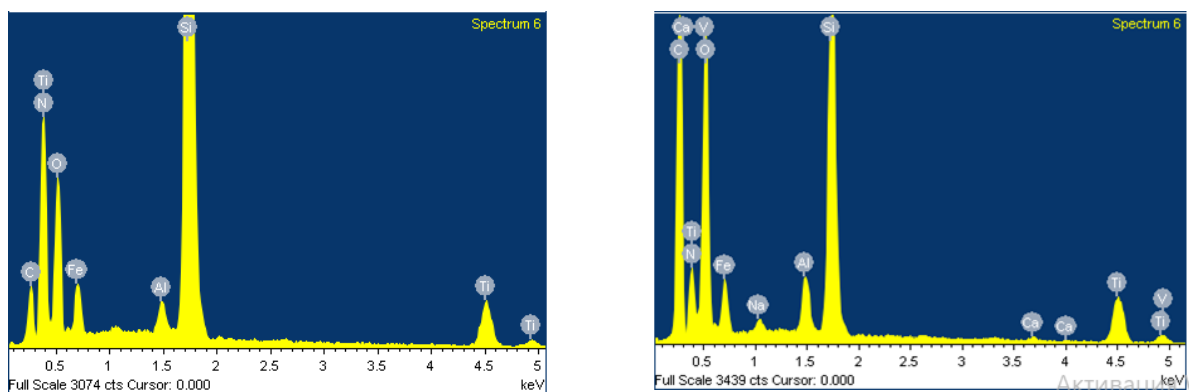
а)

б)

а) після УЗУО із використанням α - Si_3N_4 , б) після УЗУО із використанням α - Si_3N_4 та подальшого відпалу при температурі 650 °C

Рисунок 3.8 – Результати рентгеноспектрального аналізу

Як видно з рис 3.8, найбільшу інтенсивність мають піки Si та N, що свідчить про утворення покриття нітриду кремнію.



а)

б)

а) після УЗУО із використанням β - Si_3N_4 , б) після УЗУО із використанням β - Si_3N_4 та подальшого відпалу при температурі 650 °C

Рисунок 3.9 – Результати рентгеноспектрального аналізу

У табл. 3.4 наведено дані кількісного хімічного аналізу зразків після УЗУО із використанням порошків α -Si₃N₄ і β -Si₃N₄ та подальшої термічної витримки при 650 °C.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад поверхневих шарів у (% мас.)

Назва/елемент	C	N	O	Al	Si	Ti	V	Fe
α -Si ₃ N ₄	8,21	37,3	8,03	0,44	42,39	1,63	-	2,04
α -Si ₃ N ₄ + 650 °C	25,24	24,49	13,33	0,72	32,25	2,24	-	1,24
β -Si ₃ N ₄	7,47	25,42	13,07	0,93	34,41	11,38	-	7,61
β -Si ₃ N ₄ + 650 °C	33,99	-	33,96	1,93	14,17	13,1	0,81	11,0

Дані табл. 3.4 свідчать, що після УЗУО із використанням α -Si₃N₄ кількість Si (42,4 %) практично відповідає стехіометричному складу (42,8 %), а концентрація азоту (37,3 %) є дещо меншою у зв'язку із насиченням поверхневого шару киснем та вуглецем. Також варто зазначити, що для зразків після УЗУО із використанням β -Si₃N₄ як до, так і після відпалу процеси окиснення відбуваються більш інтенсивно, ніж при застосуванні α -Si₃N₄. Аналіз поверхневих досліджень зразків сплаву ВТ6 у вихідному стані та після обробки із використанням порошків оксидів на нітридів доводить можливість синтезу композитних покриттів методом УЗУО. Для подальшого дослідження синтезованих покриттів виготовлено поперечні перерізи оброблених зразків для аналізу методом РЕМ.

3.3 Аналіз мікроструктурних станів сформованих в процесі УЗУО покриттів

Дослідження мікроструктури сформованих на поверхні титанового сплаву ВТ6 покриттів ультразвуковою ударною обробкою із використанням порошків

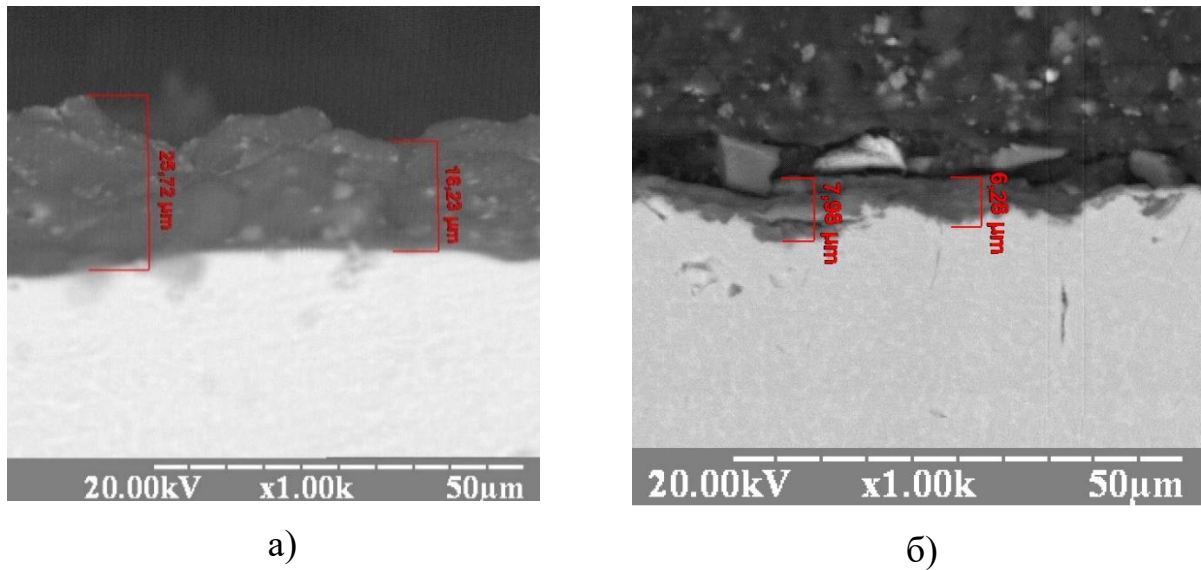
нітридів та оксидів та визначення їх товщини проведено за допомогою методу растрової електронної мікроскопії.

Для визначення мікроструктурних перетворень і виявлення змін, які відбуваються в поверхневих шарах матричного титанового сплаву та у нанесених покриттях після УЗУО, проведено зйомку поперечних перерізів двох серій зразків – до та після відпалу. Зменшення впливу вібрацій на якість результатів електронно-мікроскопічних досліджень досягалось за рахунок пресування дослідних зразків в епоксидні шайби та повторного полірування (рис. 3.10).



Рисунок 3.10 – Епоксидна шайба для РЕМ досліджень сплаву ВТ6 після УЗУО до та після термічної витримки

На рис. 3.11 показано електронно-мікроскопічні зображення поперечних перерізів зразків титанового сплаву ВТ6 після УЗУО із використанням порошку Al_2O_3 та подальшої термічної витримки при температурі 650 °С.

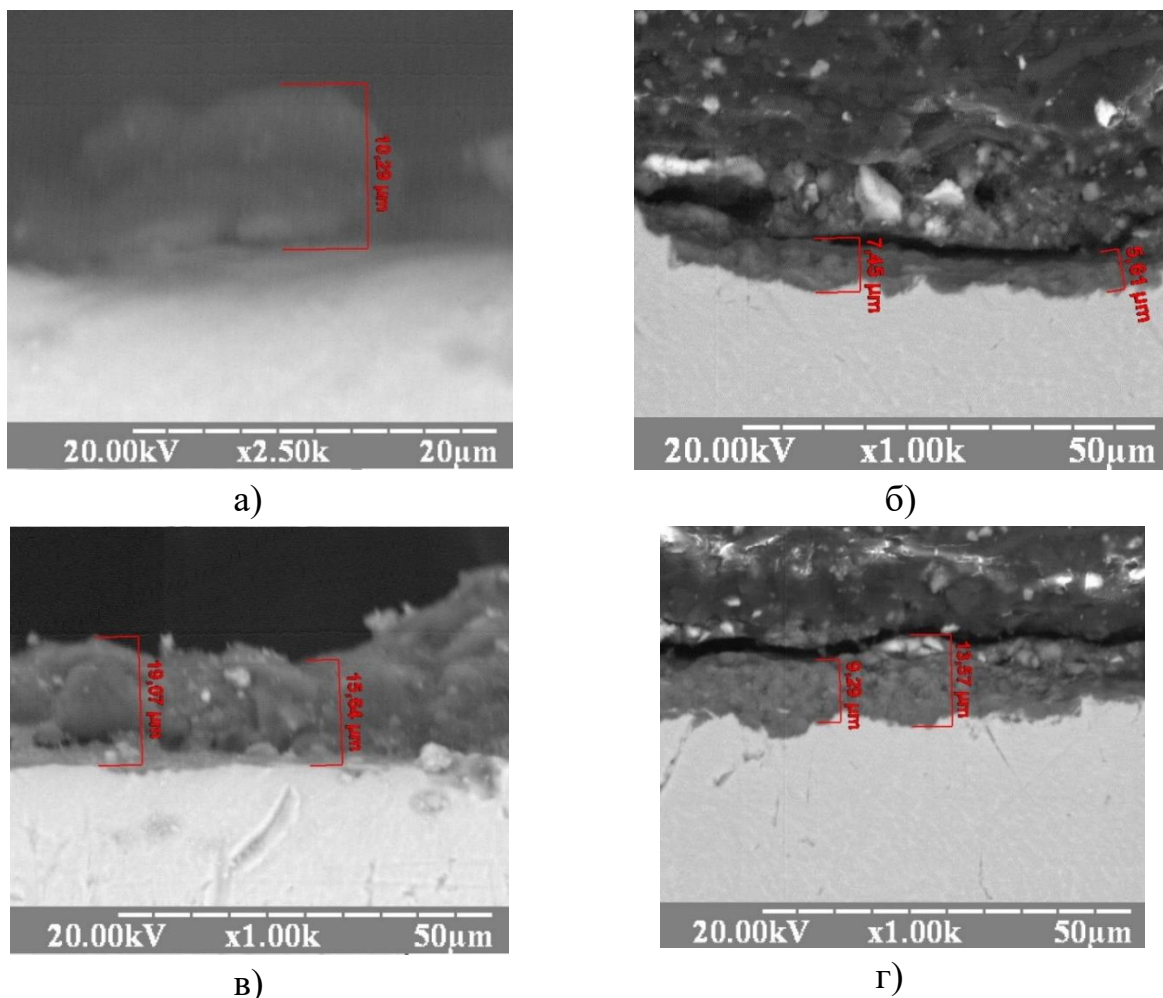


а) після УЗУО із використанням Al_2O_3 , б) після УЗУО із використанням Al_2O_3 та подальшого відпалу при температурі 650°C

Рисунок 3.11 – Електронно-мікроскопічні зображення поперечного перерізу зразків

Ці дані наочно підтверджують, що в процесі ультразвукової ударної обробки із використанням порошку Al_2O_3 на поверхні титанового сплаву ВТ6 формується захисний композитний шар із частинками відповідного порошку, розташованими у матричному сплаві. Синтезований шар характеризується незначними відхиленнями рівномірності та товщини (~ 16 мкм – 24 мкм). В процесі відпалу синтезоване покриття потоншується до товщини ~ 8 мкм, тобто приблизно у 2 рази, що може бути пов'язано із відшаруванням частини оксидного покриття під впливом напружень, які виникають в процесі відпалу та частково із механічним викришуванням в процесі виготовлення зразків.

На рис. 3.12 показано електронно-мікроскопічні зображення поперечних перерізів зразків титанового сплаву ВТ6 після УЗУО із використанням різних порошків нітридів кремнію та подальшої термічної витримки за температури 650°C .



а) після УЗУО із використанням α - Si_3N_4 , б) після УЗУО із використанням α - Si_3N_4 та подальшого відпалу при температурі 650 °С, в) після УЗУО із використанням β - Si_3N_4 , г) після УЗУО із використанням β - Si_3N_4 та подальшого відпалу при температурі 650 °С

Рисунок 3.12 – Електронно-мікроскопічні зображення поперечного перерізу зразків

У цьому випадку також в процесі ультразвукової ударної обробки на поверхні титанового сплаву ВТ6 формуються захисні композитні шари порошків нітридів Si_3N_4 . На рис. 3.12, а, показано, що синтезований шар характеризується незначними відхиленнями рівномірності та товщини (~ 6 мкм – 10 мкм), і в процесі відпалу (рис. 3.12, б) синтезоване покриття потоншується до значень ~ 6 мкм – 8 мкм, що може бути пов'язано із виникненням мінімальних термічних

напружень в процесі відпалу.

Зразок, який піддавався УЗУО із використанням порошку $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ (рис. 3.12, в), характеризується мінімальними коливаннями рівномірності та товщини (~ 15 мкм – 19 мкм). Після відпалу (рис. 3.12, г) спостерігається незначне потоншення до ~ 9 мкм – 14 мкм, що може пояснюватися із низькими значеннями рівня напружень в процесі відпалу, різниці коефіцієнтів термічного розширення сплаву ВТ6 та порошку, а також частковим механічним викришуванням в процесі виготовлення зразків.

Варто відмітити, що в усіх випадках синтезовані покриття мають високу суцільність, що свідчить про задовільну адгезію порошків із титановою матрицею ВТ6.

Визначення товщини синтезованих методом УЗУО покриттів проведено шляхом аналізу відповідних електронно-мікроскопічних зображень за допомогою програмного пакету типу Gwyddion. Це дозволило із високою точністю оцінити зміни, які відбуваються із покриттями після відпалу порівняно із вихідним станом було визначено товщини покриттів до та після термічної витримки. В табл. 3.5 наведено значення товщини покриттів зразків до та після термічного впливу.

Таблиця 3.5 – Товщина нанесених покриттів Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ на поверхню титанового сплаву ВТ6

Використаний порошок	Товщина покриття, мкм		Зміна товщини покриття, мкм	Зміна товщини покриття, %
	до відпалу	після відпалу		
Al_2O_3	20	8	12	60
$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$	9	7	2	22
$\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$	16	12	4	25

Аналіз цих результатів показав, що всі покриття потоншуються в процесі термічної витримки, однак при використанні порошків нітридів кремнію досягається кращий результат. Загалом потоншення покриттів може бути пов'язане із механічним викришуванням порошинок в процесі виготовлення дослідних зразків, слабкою хімічною взаємодією порошинок оксидів та нітридів із матрицею ВТ6 та між собою, а також внаслідок відколювання частини покриття за рахунок виникнення напружень, що з'являються в матеріалі в процесі відпалу, як результат відмінності лінійних коефіцієнтів термічного розширення покриттів і титанової матриці та відмінності періодів і типу ґратки.

Можна підсумувати, що покриття синтезовані на основі різних модифікацій Si_3N_4 мають відносно однакові характеристики, як до так і після відпалу. Щодо покриття Al_2O_3 , то спостерігається його значне потоншення (на 60 %) в процесі термічної витримки. Це може бути обґрунтовано різною інтенсивністю механо-хімічних реакцій, які відбуваються в процесі синтезу композитних шарів із різними порошками.

3.4 Фазовий склад поверхневих шарів титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки

Результати мікрорентгеноспектрального аналізу підтверджують наявність на поверхні титанового сплаву ВТ6 елементів, які входять до хімічного складу використаних порошків, однак для точного встановлення змін, які можуть відбуватися в процесі ультразвукової ударної обробки та подальшого відпалу, потрібно отримати інформацію щодо фазового складу сформованих покриттів. Тому проведено додаткові дослідження за допомогою методу рентгеноструктурного аналізу.

На рисунку 3.13 наведено дифрактограму, отриману від зразка сплаву ВТ6 у вихідному стані після відпалу за температури 650 °С. В результаті індиціювання встановлено наявність дифракційних максимумів α -Ті

(матричного сплаву ВТ6), а також рефлекси малої інтенсивності (сліди) оксиду титану TiO_2 , що може свідчити про утворення оксидної плівки впродовж термічної обробки. У той же час рефлекси оксиду алюмінію Al_2O_3 не спостерігаються, що узгоджується з фактом відшарування поверхневих оксидних плівок під час охолодження в процесі циклічної термічної витримки. Дійсно, згідно літературних даних, а також власних попередніх експериментів, впродовж тривалого високотемпературного окиснення сплаву ВТ6 на його поверхні за певних температур можуть формуватись шаруваті оксидні плівки, утворені шарами оксиду алюмінію ближче до вільної поверхні та оксиду титану ближче до об'єму зразка. У нашому випадку, поверхневі плівки оксиду алюмінію, які формуються впродовж процесу нагрівання і високотемпературної витримки, щоразу відшаровуються.

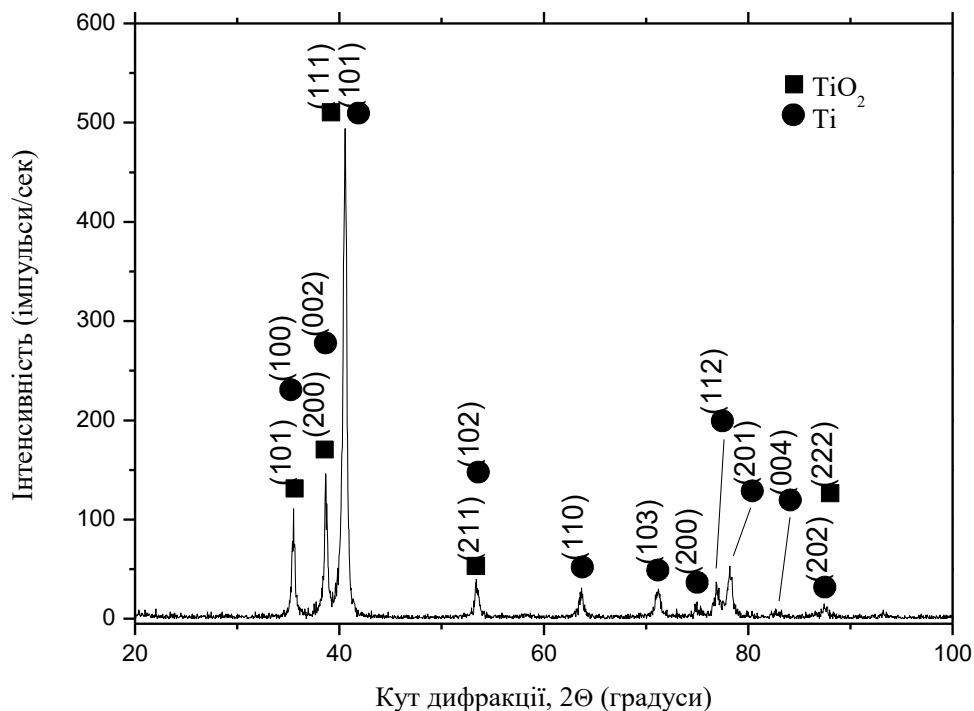
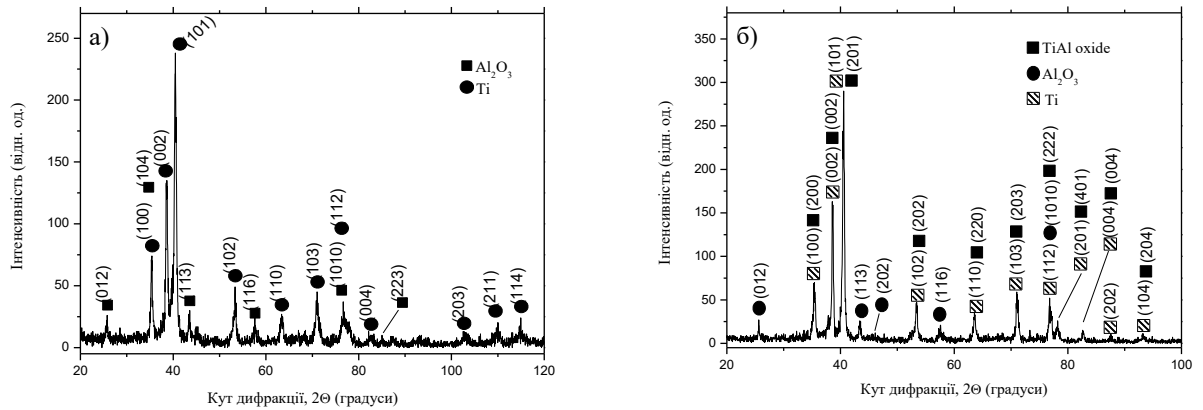


Рисунок 3.13 – Дифрактограма зразка ВТ6 після відпалу за температури 650 °C

На рисунку 3.14 наведено серію дифрактограм, отриманих від зразків сплаву ВТ6 після УЗУО з використанням порошку Al_2O_3 до (рис. 3.14, а) та після (рис. 3.14, б) відпалу за температури 650°C .

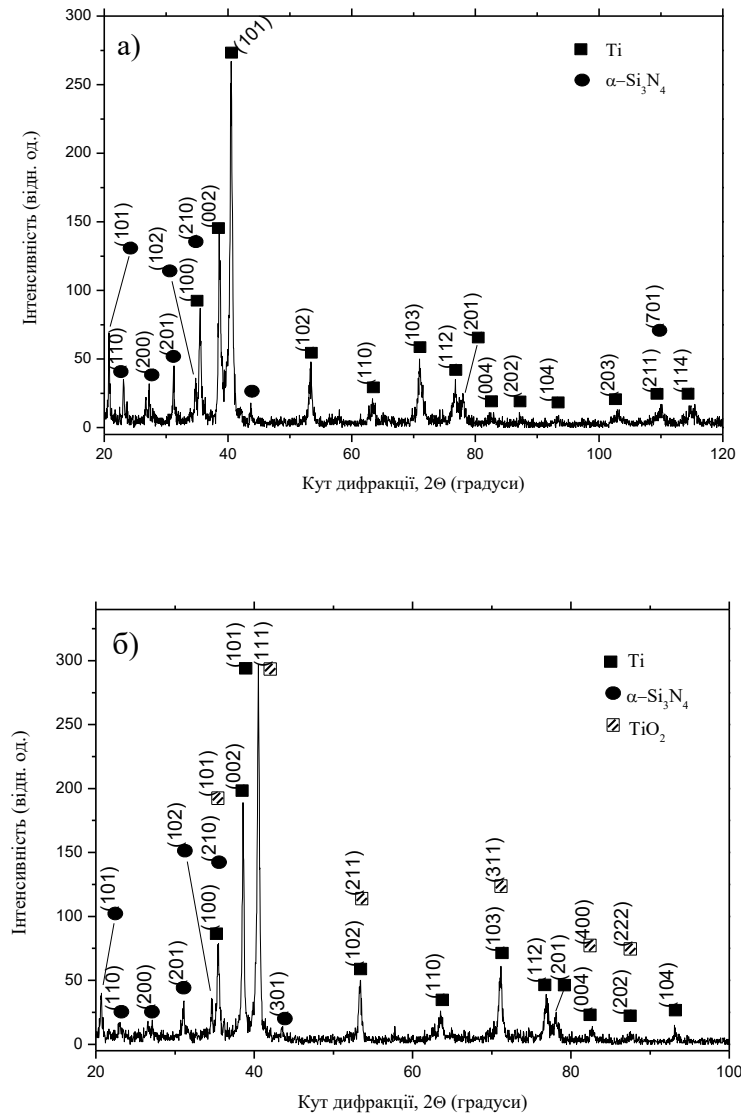


а) до відпалу за температури 650°C , б) після відпалу за температури 650°C

Рисунок 3.14 – Дифрактограми зразків ВТ6 + Al_2O_3

В результаті аналізу виявлено дифракційні максимуми від титанової матриці ВТ6, а також рефлекси від оксиду алюмінію Al_2O_3 та складного оксиду Ті і Аl (шпінелі Al_2TiO_5), хоча кількість останнього доволі незначна. Ці дані підтверджуються результатами енергодисперсійного аналізу хімічного складу поверхонь (табл. 3.3), отриманого за допомогою РЕМ. Тобто, можна стверджувати, що відбувається формування композитного шару після УЗУО та утворення щільного захисного покриття Al_2O_3 після відпалу за температури 650°C .

На рисунку 3.15 наведено серію дифрактограм, отриманих від зразків сплаву ВТ6 після УЗУО з використанням порошку $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ до (рис. 3.15, а) та після (рис. 3.15, б) відпалу за температури 650°C .



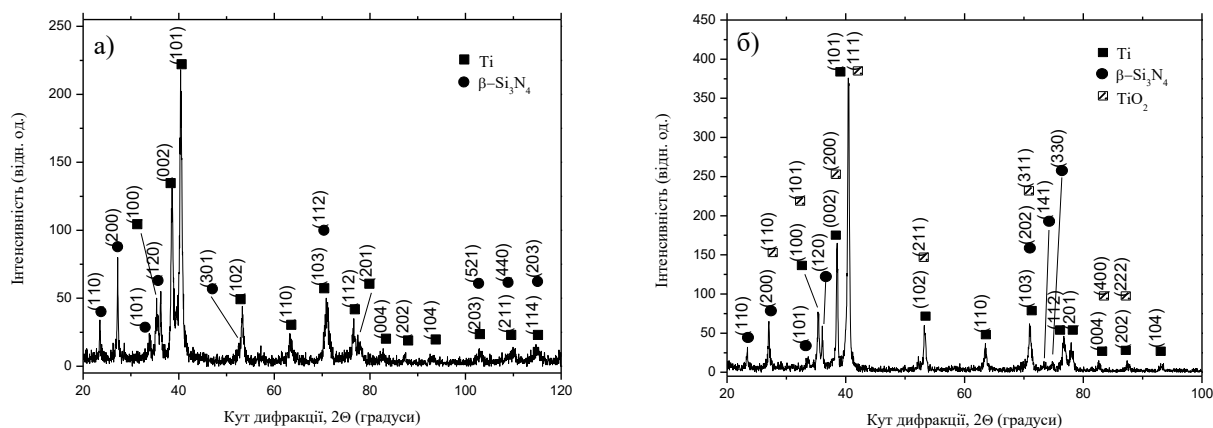
а) до відпалу за температури 650 °С, б) після відпалу за температури 650 °С

Рисунок 3.15 – Дифрактограми зразків ВТ6 + α - Si_3N_4

Встановлено, що у зразку, який не піддавався відпалу, фіксується наявність Ті та нітриду Si_3N_4 . Стосовно відпаленого зразку, то на його дифрактограмі з'являються максимуми від оксиду титану, проте дані кількісного фазового аналізу свідчать про невелику кількість останнього $\sim 1\%$. Тобто захисне покриття складу Si_3N_4 є термічно стабільним, а утворення оксиду титану в основному відбувається на межі розділу із матричним сплавом завдяки

проникненню кисню, оскільки за даними хіманалізу (табл. 3.4) кількість Ti у синтезованому покритті $\sim 2\%$.

На рисунку 3.16 наведено серію дифрактограм, отриманих від зразків сплаву ВТ6 після УЗУО з використанням порошку $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ до (рис. 3.16, а) та після (рис. 3.16, б) відпалу за температури 650°C .



а) до відпалу за температури 650°C , б) після відпалу за температури 650°C

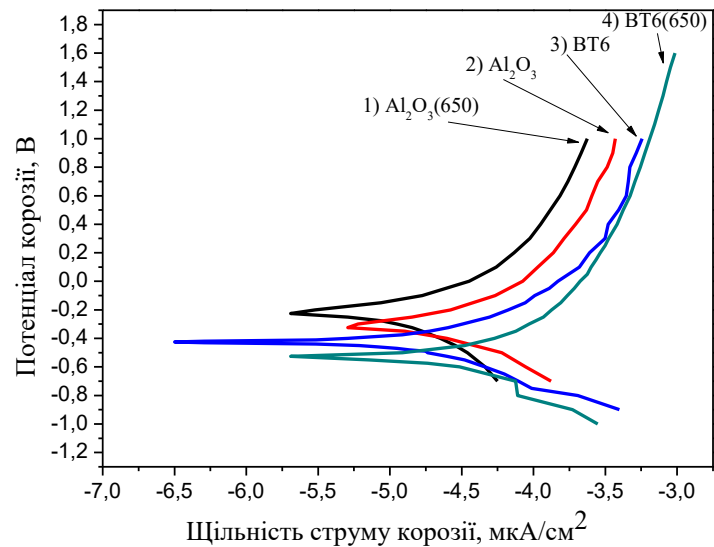
Рисунок 3.16 – Дифрактограми зразків ВТ6 + $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$

Отримані результати підтверджують, що фазовий склад сформованих методом УЗУО композитних шарів відповідає $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, про що свідчить присутність відповідних дифракційних рефлексів. Після термічної обробки з'являється незначна кількість оксиду титану TiO_2 ($\sim 1\%$). Таким чином використання порошків α - та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, дозволяє в процесі УЗУО поверхні сплаву ВТ6 одержати відповідні покриття із високою жаростійкістю за умов циклічного нагрівання-охолодження в інтервалі температур $20^\circ\text{C} - 650^\circ\text{C}$.

3.5 Корозійні властивості титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки із використанням порошків

З метою виявлення впливу УЗУО із додаванням порошків оксидів та нітридів на корозійні властивості одержано криві поляризації для зразків сплаву

ВТ6 у вихідному стані, після відпалу за температури 650 °С, а також із композитним покриттям Al_2O_3 до та після відпалу за аналогічної температури (рис. 3.17).



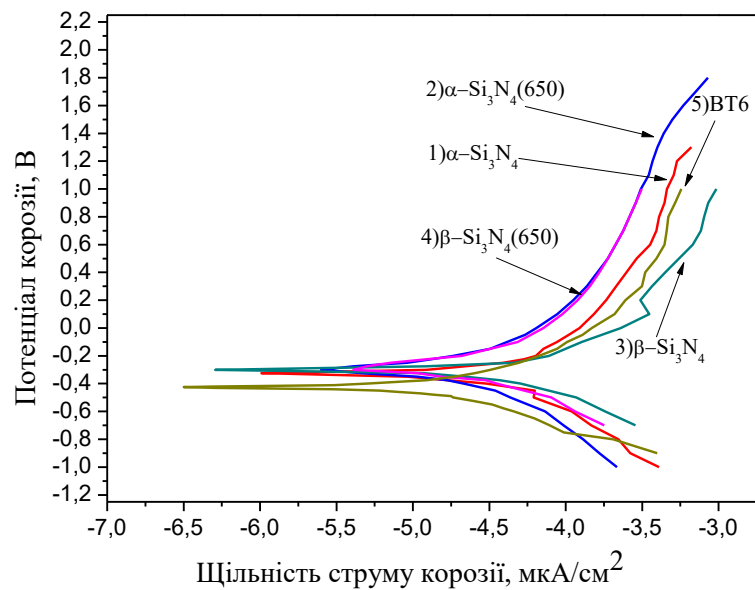
1) після УЗУО із використанням Al_2O_3 та подальшого відпалу за 650 °С, 2) після УЗУО із використанням Al_2O_3 , 3) у вихідному стані, 4) після відпалу за 650 °С

Рисунок 3.17 – Корозійні залежності потенціалу корозії від щільності струму

Можна стверджувати, що формування композитного шару внаслідок УЗУО із порошком Al_2O_3 сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні сплаву ВТ6 порівняно з необробленим зразком, оскільки спостерігається зростання потенціалу корозії та зменшення струму корозії (крива 2). Після відпалу зразка ВТ6 із сформованим композитним шаром з частинками Al_2O_3 реєструється додаткове покращення електрохімічних характеристик (крива 1) – потенціал корозії стає ще більш позитивним. Тобто, корозійна стійкість поверхні сплаву ВТ6 з композитним покриттям після відпалу зростає, що може бути пов'язане з формуванням суцільного оксидного шару за рахунок окиснення матричного сплаву з утворенням на поверхні оксиду алюмінію та його спіканням з частинками Al_2O_3 , втіленими у матричний сплав внаслідок УЗУО. При цьому

важливу роль відіграє перебіг дифузійних процесів під впливом високих температур.

На рисунку 3.18 наведено криві корозії зразків сплаву ВТ6 у вихідному стані, після відпалу при температурі 650 °С, а також після формування композитних шарів під час УЗУО із використанням різних модифікацій (α і β) порошків Si_3N_4 та додаткового відпалу за температури 650 °С.



1) після УЗУО із використанням $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$, 2) після УЗУО із використанням $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та подальшого відпалу за 650 °С, 3) після УЗУО із використанням $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$, 4) після УЗУО із використанням $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ та подальшого відпалу при 650 °С, 5) вихідний стан

Рисунок 3.18 – Корозійні залежності потенціалу корозії від щільності струму

Таким чином порівняно з необробленим зразком ВТ6, синтез композитних шарів методом УЗУО із використанням порошків нітридів кремнію, дозволяє покращити корозійну стійкість сплаву ВТ6, потенціал корозії збільшується, причому при застосуванні α - та β -модифікації Si_3N_4 досягається приблизно однаковий результат. Після додаткового відпалу спостерігається зменшення струму корозії, тобто покращення корозійних властивостей, що може бути

пов'язане із протіканням дифузійних процесів під впливом високих температур і спіканням частинок з окисненим матричним сплавом у сформованих за умов УЗУО композитних шарах.

3.6 Зносостійкість і трибологічні властивості покриттів на сплаві ВТ6

Проведено випробування на зносостійкість на автоматизованому трибологічному комплексі АТКД [40]. За результатами випробувань отримано доріжки тертя із зонами впливу статичного навантаження та динамічного навантаження. Результати випробувань на зносостійкість та тертя приведено на рис. 3.19 та 3.20.

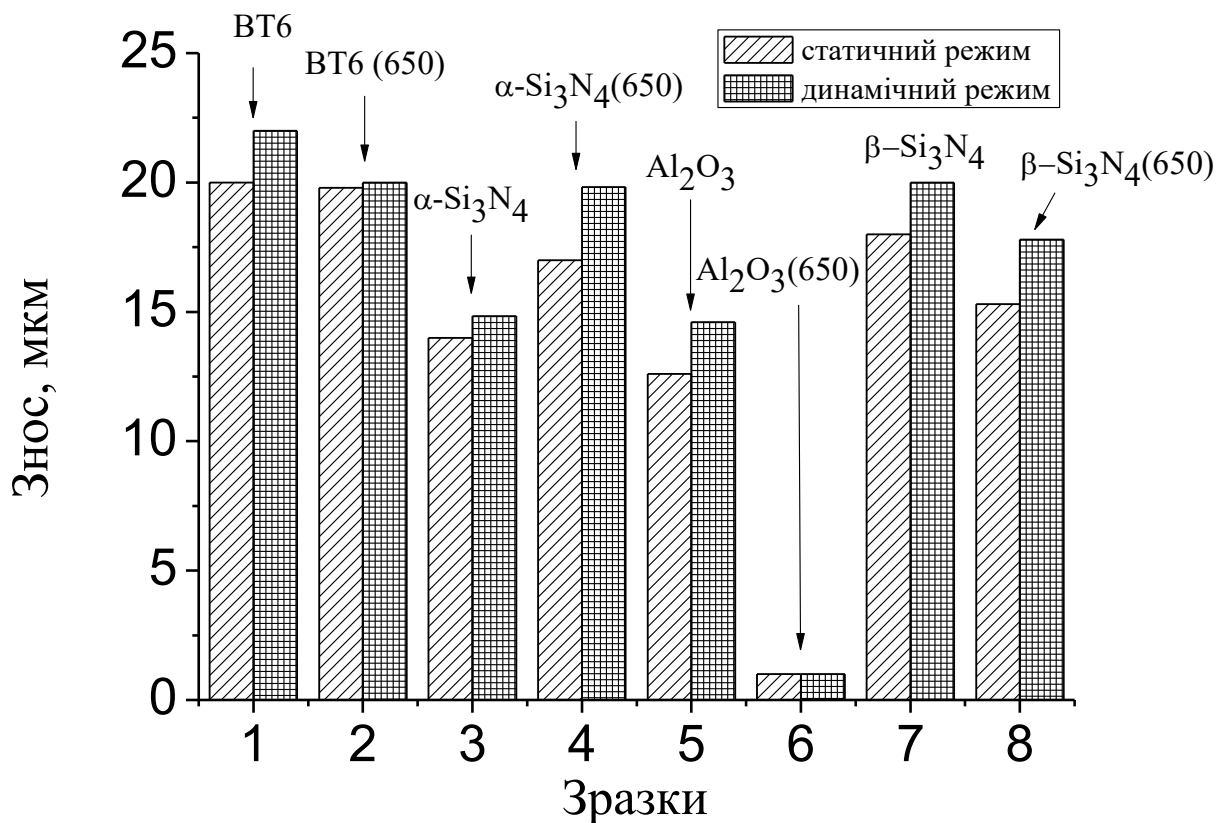


Рисунок 3.19 – Результати випробувань на зносостійкість

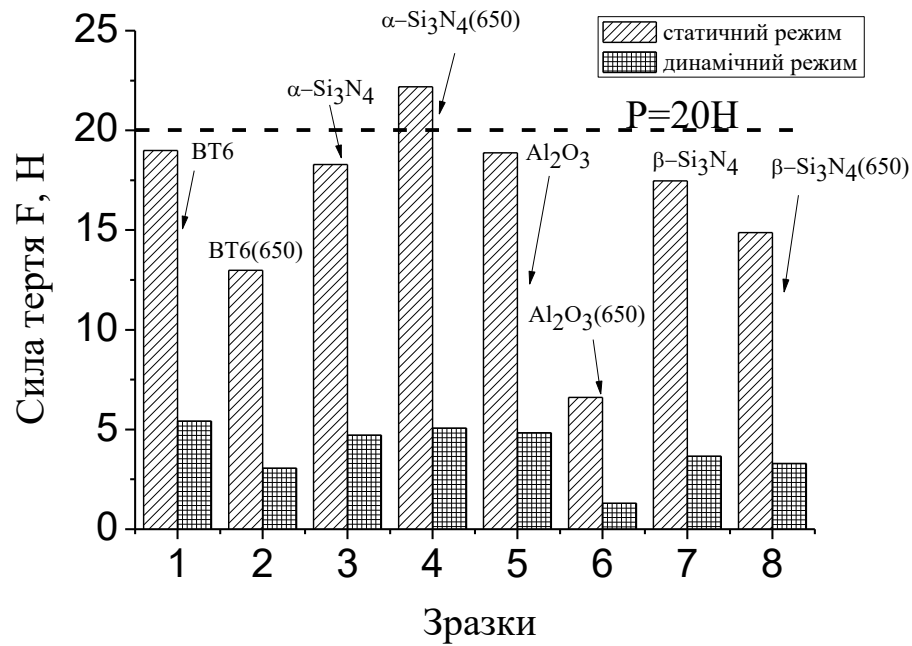


Рисунок 3.20 – Показники зносу та сили тертя при порівняльних випробуваннях зразків

Також наведено діаметр поверхні контакту, що виникла на контртілі після випробувань за рахунок налипання матеріалу зразка (рис. 3.21).

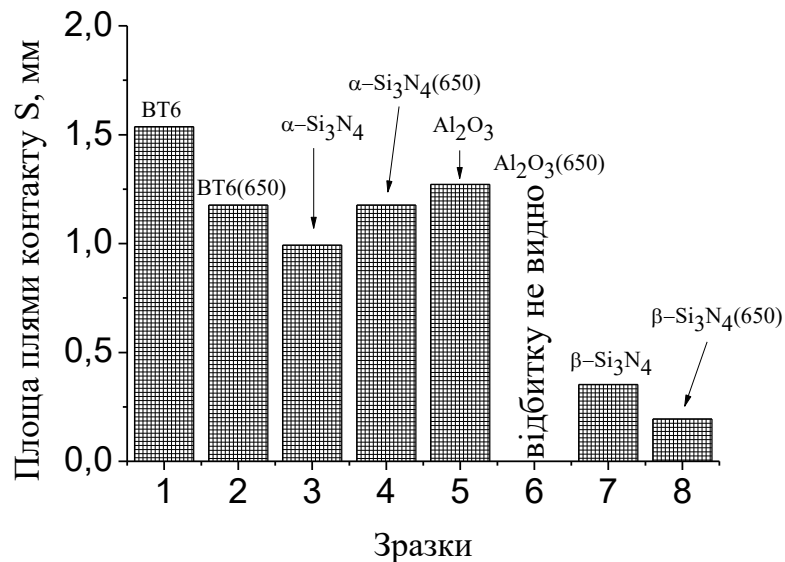
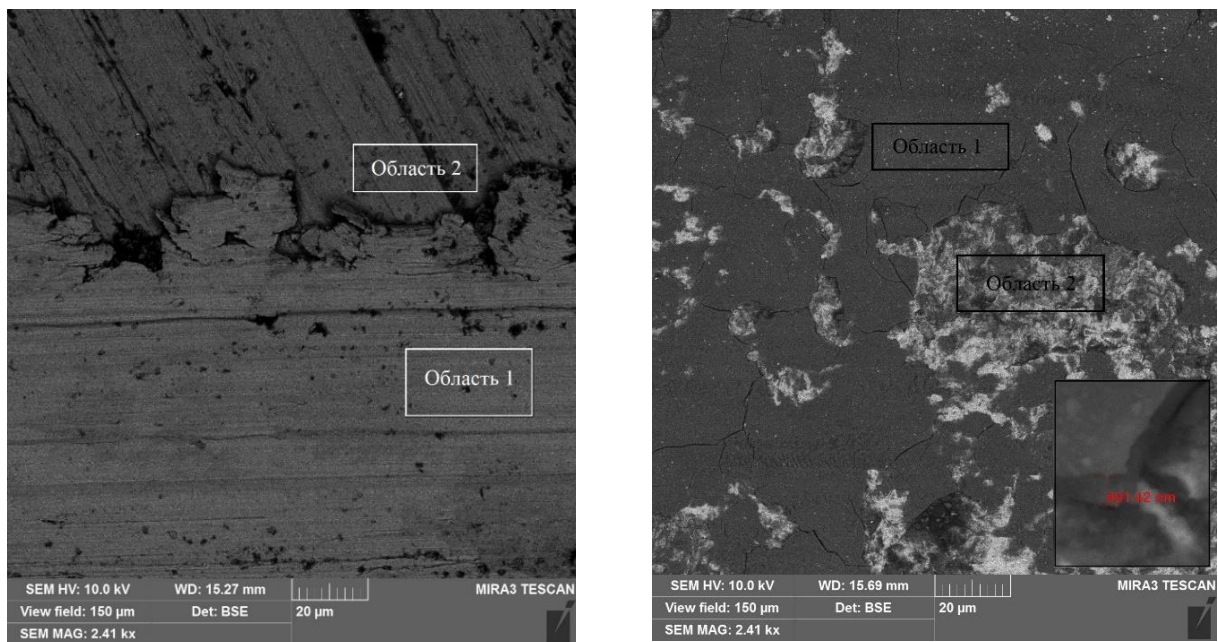


Рисунок 3.21 – Порівняння діаметрів поверхні контакту на контртілі (Al_2O_3) після випробувань зразків

Як видно з рис. 3.19, 3.20 хорошу зносостійкість при достатньо низькому коефіцієнті тертя показав зразок 6, покриття на якому не зазнало руйнувань і величина зносу якого співвідносна шорсткості поверхні. Також при цьому не було виявлено плям контакту на контртілі Al_2O_3 (рис. 3.21). Всі інші зразки були зношені до значень 15 мкм – 20 мкм, при високій силі тертя в статичному режимі випробувань, а у випадку зразка 4 спостерігалось схватування. Це цілком можна пояснити меншими розмірами Si_3N_4 (а отже – гіршими можливостями щодо їх проникнення у поверхневий шар матричного сплаву при УЗУО). В динамічному режимі випробувань, не зважаючи на значно меншу силу тертя, на зразках також отримали значний знос, співвідносний зі статичним режимом, що свідчить про нечутливості матеріалу до зміни режимів.

На рис. 3.22 наведено РЕМ-зображення вихідного та відпаленого зразків після випробувань на зносостійкість.



а) ВТ6 після відпалу, б) УЗУО + Al_2O_3 після відпалу

Рисунок 3.22 – РЕМ-зображення доріжок тертя після випробувань на зносостійкість

З рис. 3.22 можна бачити, що стан поверхні зразків суттєво відрізняється. В табл. 3.6. наведено дані хімічного аналізу різних областей зразків.

Таблиця 3.6 – Хімічний склад поверхневих шарів у % (масових)

Назва/елемент	C	O	Al	Ti	V	Fe
BT6 + 650 °C, область 1 (область тертя)	2,9	-	5,98	87,01	4,11	-
BT6 + 650 °C, область 2 (без тертя)	3,21	30,44	19,65	44,92	1,78	-
Al ₂ O ₃ + 650 °C, область 1	13,53	50,93	27,7	6,34	0,31	1,18
Al ₂ O ₃ + 650 °C, область 2	6,6	31,28	12,89	46,33	2,18	0,71

З таблиці 3.6 видно, що область 2 вихідного стану BT6 після відпалу підтверджує літературні дані, а саме утворення оксидної плівки Al₂O₃ на поверхні титанового сплаву BT6, про що сигналізує значна кількість кисню та алюмінію. В області 1, що піддавалася випробуванням на зношування спостерігається руйнування оксидного шару, про що сигналізує хімічний склад відповідний чистому сплаву BT6. Для зразка УЗУО + Al₂O₃ після відпалу спостерігається спрацювання синтезованого покриття із контртілом, про що свідчить утворення площинок та значне зменшення шорсткості поверхні в області 1. Також процес зношування супроводжується потоншенням внаслідок відлущування площинок синтезованого покриття (область 2). Припускається, що порошинки Al₂O₃ у деформаційно створеному композитному шарі слугують при термообробці на повітрі своєрідними зародковими центрами для природної плівки Al₂O₃, що формується при окисненні.

3.7 Висновки до розділу 3

1. Доведено можливість підвищення жаростійкості титанового сплаву ВТ6 методом ультразвукової ударної обробки його поверхні із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. Найбільш суттєвий ефект за даними гравіметричного аналізу спостерігається при використанні порошку $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ – втрата маси після циклічного відпалу (10 мг) зменшується приблизно у 3 рази порівняно із вихідним зразком сплаву ВТ6 (28 мг).

2. Підтверджено, що синтезовані захисні покриття шляхом ультразвукової ударної обробки титанового сплаву ВТ6 із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ мають відповідний фазовий та хімічний склад, тобто складається із подрібнених та ущільнених порошків.

3. Товщина синтезованих покриттів до відпалу становить 20 мкм у випадку використання Al_2O_3 та 9 мкм і 16 мкм у випадку використання α - та β -модифікацій Si_3N_4 , відповідно.

4. Можна стверджувати, що формування композитного шару внаслідок УЗУО із різними порошками сприяє підвищенню корозійної стійкості поверхні сплаву ВТ6 порівняно з необробленим зразком, оскільки спостерігається зростання потенціалу корозії та зменшення струму корозії. Після відпалу зразка ВТ6 із сформованим композитним шаром з частинками Al_2O_3 реєструється додаткове покращення електрохімічних характеристик – потенціал корозії стає ще більш позитивним.

5. Доведено, що ультразвукова ударна обробка титанового сплаву ВТ6 із використанням різних модифікацій Si_3N_4 приводить до покращення зноостійких властивостей всього на 5 % – 10 %. Найкращі результати досягаються при використанні Al_2O_3 у даному випадку спостерігається підвищення зноостійкості у декілька разів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Мета даного розділу – аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що можуть призвести до ураження організму та умов, котрі спричиняють травмування під час проведення синтезу захисних покриттів на поверхні титанового сплаву ВТ6 методом ультразвукової ударної обробки.

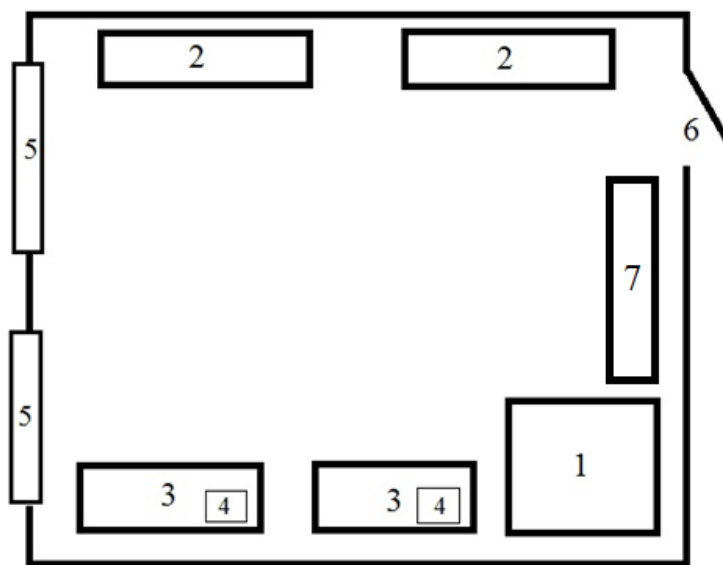
4.1 Правові та організаційні основи охорони праці на підприємстві

Служба охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського (в якому була проведена робота) підпорядковується ректору М.З. Згуровському. Посаду начальника відділу охорони праці в КПІ ім. Ігоря Сікорського займає Е.Г. Луцик. Відповідальною особою, що гарантує дотримання вимог охорони праці на інженерно-фізичному факультеті є П.І. Лобода, на кафедрі фізики металів (5 поверх навчального корпусу № 9) – Є.В. Іващенко, в науково-дослідній лабораторії № 507, в якій проведено наукові дослідження по роботі – А.І. Мазур.

4.2 Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

4.2.1 Мікроклімат

Магістерська дисертація виконана в лабораторії № 507, 5 поверху, навчального корпусу № 9 кафедри фізики металів КПІ ім. Ігоря Сікорського. Схематичне зображення лабораторії із розташуванням всіх її елементів представлено на рис. 4.1.



1 – пічка для відпалу (робоче місце); 2 – шафа; 3 – стіл; 4 – комп'ютер; 5 – вікно; 6 – двері; 7 – стелаж для розміщення дослідних зразків

Рисунок 4.1 – Схема лабораторного приміщення в якому виконувалася дипломна робота

Проведено вимірювання параметрів лабораторного приміщення:

- 1) розміри кімнати: ширина – 6 м, довжина – 7 м, висота – 2,7 м.
- 2) розміри вікон: ширина – 2,8 м, висота – 2,5 м.

Лабораторне приміщення № 507, в якому працює одна особа має площу 42 м^2 та об'єм $113,4 \text{ м}^3$. Розрахована площа, що приходить на одну людину становить 42 м^2 , та об'єм – $113,4 \text{ м}^3$. Отже, об'єм та площа лабораторії відповідають нормам, відповідно до ГОСТ 12.2.032-78, що встановлює норми на величину робочого простору, де на робоче місце однієї людини має відводитись не менше 6 м^2 площі та 20 м^3 об'єму [43].

Також важливим аспектом (фактором) для нормальної працездатності працівників є чистота повітря в робочій зоні, освітленість і температура в робочому приміщенні та багато інших чинників, тому виконання магістерської дисертації супроводжувалося дослідженням мікроклімату в приміщенні лабораторії № 507 [43].

Відповідно до «Санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень» ДСН 3.3.6.042-99 встановлюються оптимальні та допустимі параметри, а саме відносна вологість, температура та швидкість руху повітря у робочому приміщенні в залежності від періоду року та категорії важкості робіт [44].

Згідно із ДСН 3.3.6.042-99 умови мікроклімату відносяться до категорії важкості робіт – I б. До даної категорії належать легкі фізичні роботи до 150 Ккал/год, котрі супроводжуються виникненням деякого рівня фізичних напруг, що виконуються сидячи чи стоячи та роботи пов'язані з ходінням [44]. Виміряні та нормовані величини параметрів мікроклімату в робочому приміщенні № 507 наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Мікроклімат приміщення та ДСН 3.3.6.042-99 [44]

Пора року	Категорія робіт	Температура, °С			Відносна вологість, %			Швидкість руху повітря, м/с		
		фактич.	допуст.	оптималь.	фактич.	допуст.	оптималь.	фактич.	допуст.	оптималь.
холодна	I б	22	20-24	21-23	59	<75	60-40	0,1	0,1-0,3	0,1
тепла		28	21-28	22-24	55	<65	60-40	0,2	0,1-0,3	0,2

Аналіз виміряних величин дозволяє стверджувати, що фактичні параметри мікроклімату відповідають оптимальним умовам, за винятком температури повітря в теплий період року. Для постійної роботи в даному приміщенні, тобто забезпечення оптимальних умов, рекомендується встановлення кондиціонера для охолодження повітря.

Для непостійних та короточасних робіт параметри мікроклімату даного приміщення відповідають встановленим нормам.

4.2.2 Освітленість

Освітлення робочого приміщення поділяється на:

- 1) природне;
- 2) штучне;
- 3) суміщене.

Природне в свою чергу створюється дією прямих сонячних променів, штучне реалізується за допомогою електричних джерел світла, суміщене внаслідок комбінації природного та штучного. В залежності від характеристики зорових робіт, системи освітлення, найменшого розміру об'єкта розрізнення, контрасту об'єкта розрізнення з фоном, природне і штучне освітлення робочої зони регламентуються нормами ДБН В.2.5-28-2006 [45].

В свою чергу природне освітлення можна поділити на: бокове (здійснюється через світлові отвори в зовнішніх стінах), верхнє (реалізується через ліхтарі та отвори в стелях та перекриттях) та комбіноване, яке є поєднанням двох попередніх [46].

У лабораторній кімнаті № 507 втілюється комбінація природного бокового освітлення та штучного. Дане приміщення характеризується розміщенням вікон з північного боку лабораторії. Відстань від вікна до робочого місця, тобто місця основної роботи складає 4 м. Виходячи з того факту, що розміри зразків не перевищують 5 мм, то дослідну роботу можна прирахувати до класу робіт малої точності (розряд зорових робіт V б). Як було вказано раніше, в дослідній лабораторії втілюється комбінація природного та штучного освітлення. Місцеве освітлення реалізується лампами розжарювання, а загальне – за допомогою 24 люмінесцентних ламп ЛБ-40 [46].

Загальновідомий факт, що правильно організоване освітлення приводить до підвищення рівня працездатності людини, продуктивності та якості виготовленої продукції, зниження рівня виробничого травматизму тощо. До прикладу, збільшення освітленості приміщення зі значень 100 люкс до

1000 люкс при напруженій зоровій роботі забезпечує підвищення продуктивності праці на 10 % – 20 %, зменшення браку на виробництві на 20 %, зниження кількості нещасних випадків на 30 % [46].

4.2.3 Шум

Під шумом розуміється абиякий небажаний звук, який призводить до погіршення самопочуття та здоров'я людини, а також знижує її працездатність та сприяє до отримання травм внаслідок підвищення рівня розсіяності та уважності [46]. Магістерська дисертація здійснювалась на установці для ультразвукової ударної обробки, котра створює певний рівень шуму в процесі роботи.

Довготривала дія шуму на людину може викликати наступні порушення:

- 1) погіршення пам'яті;
- 2) запаморочення;
- 3) підвищена стомлюваність;
- 4) дратівливість.

Довготривалий та систематичний вплив ультразвукових коливань негативно впливає на організм людини та може викликати порушення нервової, серцево-судинної і ендокринної систем та порушення слуху [46].

Засоби індивідуального захисту від шуму та ультразвуку: протишумні (звукоізолюючі) навушники, шоломи, костюми, звукоізолюючі кабіни, акустичні екрани, тощо. В даній роботі застосовувалися протишумні навушники та акустичні екрани [46].

Встановлення граничних величин шуму на робочих місцях та лабораторних приміщеннях забезпечує ДСН 3.3.6.037-99. Даний документ встановлює принципи, щодо певних параметрів шуму, виходячи з класифікації приміщень за їх використанням для трудової діяльності різних напрямів [47].

Також варто додати, що рівень ультразвуку, який виникає в процесі УЗУО знаходиться в межах норми (не потрапляє в зону знаходження оператора).

4.2.4 Вібрації

При роботі за установкою для ультразвукової ударної обробки виникає певний рівень вібрацій.

Під вібраціями розуміються механічні коливання пружних тіл або коливальні рухи механічних систем. Загалом вплив вібрацій спричиняє негативну дію на організм людини [46].

Найголовнішим методом захисту від вібрації, котрий використовується в інженерії, а також в даній роботі, є їх гасіння, внаслідок ізоляції джерел коливань від опорних поверхонь за допомогою гумових, пружинних або комбінованих ізоляторів [46].

Частотний діапазон вібрацій, котрі діють на людину складає від десятих часток одного Гц до декількох тисяч Гц. Характерними ознаками шкідливого впливу вібрації на людину є зміни її функціонального стану:

- 1) підвищена втомлюваність;
- 2) збільшення часу моторної реакції;
- 3) порушення вестибулярної реакції.

Медичні дослідження показали, що результат впливу вібрацій викликає розвиток нервово-судинних розладів, ураження опорно-рухової та інших систем організму. До лікувально-профілактичних методів зменшення впливу вібрацій належать масажі, гідропроцедури та заходи спрямовані на загальне укріплення організму [46].

Засоби захисту від вібрації подані в державному стандарті ГОСТ 12.1.012-2004. ССБТ "Вібраційна безпека. Загальні вимоги" [48].

4.2.5 Електробезпека

Електробезпека – система організаційних і технічних заходів та засобів, котрі забезпечують захист людей від шкідливої і небезпечної дії електричного струму, електричної дуги, електричного поля і статичної електрики [46].

У дослідній лабораторії № 507-9 розміщено декілька електричних приладів, а саме персональний комп'ютер, електрична піч та установка для ультразвукової ударної обробки.

Згідно із діючими правилами побудови та розміщення електроустановок ДНАОП 0.00-1.32-01 дослідне приміщення № 507-9 з точки зору небезпеки ураження електричним струмом належить до класу приміщень без підвищеної небезпеки (сухі приміщення із температурою повітря 18°C – 25°C та струмонепрвідною підлогою) [49]. Електроустановки, котрі використовувалися при виконанні магістерської дисертації, живляться напругою 220 В (персональний комп'ютер, установка для ультразвукової ударної обробки та електрична піч) змінного струму частотою 50 Гц.

Головні чинники, які впливають на тяжкість ураження людини електричним струмом, поділяються на три групи: електричного характеру, неелектричного характеру і чинники виробничого середовища [46].

Основні характеристики електричного характеру:

- 1) величина струму, що проходить крізь людину;
- 2) напруга;
- 3) опір тіла людини;
- 4) рід і частота струму.

До основних чинників неелектричного характеру належить шлях струму через людину, індивідуальні особливості та стан організму людини, а також час дії струму. Чинниками виробничого середовища являються умови оточуючого середовища, а також схема включення людини в електричну мережу [46].

Під час розробки захисних заходів, важливим критерієм є величина струму. Прийнято вважати небезпечним струм величиною 25 мА, тобто такий, при якому важко самотійно відірватись від провідника. Струм величиною 100 мА вважається смертельно небезпечним. Електричний струм здійснює термічний, електролітичний та біологічний вплив на людину при проходженні через неї [46, 49]. Термічний вплив призводить до отримання серйозних опіків окремих частин тіла, пошкодження судин та нервів. Електролітичний вплив призводить до розкладання крові та інших органічних речовин, як наслідок викликає порушення їх фізико-хімічного складу. Біологічний вплив проявляє себе у вигляді особливого специфічного процесу. Навчальна лабораторія № 507, в якій проводилися дослідження, характеризується правильно виконаним захисним заземленням корпусів, електроустаткування та приладів. Розташування робочого місця виключає можливість одночасного доторкання до корпусів електроустаткування та приладів.

4.3 Інженерні рішення для забезпечення безпеки праці

4.3.1 Організація робочого місця

Виробничі приміщення, організації і обладнання робочих місць наведені в НПАОП 0.00-7.15-18. Організація робочого місця користувача персонального комп'ютера має забезпечувати підтримання оптимальної робочої пози із наступними ергономічними характеристиками [50, 51]:

- 1) зап'ястя зігнуті під кутом не більше 15° – 20° відносно вертикальної площини;
- 2) лікті зігнуті під кутом 70° – 90° до вертикальної площини;
- 3) передпліччя встановлені у вертикальному положенні;
- 4) стегна знаходяться в горизонтальній площині;
- 5) ступні ніг розміщені на підлозі або на підставці для ніг.

Висота робочої поверхні столу для роботи у сидячому положенні в межах 680 мм – 800 мм, а ширина забезпечувати здатність працівника до виконання необхідних операцій в зоні досяжності моторного поля. Рекомендовані параметри столу для роботи: висота – 725 мм, ширина робочої зони в межах від 600 мм до 1400 мм, довжина від 800 мм до 1000 мм [50].

4.3.2 Вентиляція

Відповідно до ДСТУ 2388-94 місцева вентиляція повинна забезпечувати вилучення забрудненого повітря із зон, в основному, зосередженого виділення шкідливих речовин. В інших випадках може використовуватись загальнообмінна вентиляція. Загалом, вона повинна виконуватись у комбінації з місцевою вентиляцією, котра розрахована на видалення з виробничого приміщення шкідливих речовин нелокалізованих місцевими витяжними пристроями [52].

4.4 Розрахунок інженерного рішення

4.4.1 Розрахунок вентиляції

Розрахунок об'єму повітря, котре необхідно видалити місцевою вентиляцією L_m , визначають, виходячи з заданої швидкості всмоктування біля джерела виділення шкідливих речовин, характеристики спектру швидкостей всмоктування для певної конструкції всмоктувального отвору та наявності поверхонь, що огорожують зону всмоктування. У цьому випадку [53, 54]:

$$L_m = 3600 \cdot F_0 \cdot V_0 \quad (4.1)$$

де F_0 – площа відкритого перерізу витяжного отвору відсмоктувача, m^2 ;

V_0 – швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі, m/s .

Площу F_0 визначають конструктивними особливостями технологічного обладнання та вибраного витяжного пристрою [53, 54].

Значення V_0 розраховується на підставі забезпечення заданої швидкості повітря V_x (0,5 м/с) у зоні обробки на відстані x від центра всмоктуючого отвору [53, 54]:

$$V_0 = 16 \cdot V_x \cdot (x/d)^2 \quad (4.2)$$

де d – діаметр отвору, м;

x – відстань до робочої поверхні, м.

На рис. 4.2 наведено принципову схему місцевої вентиляції необхідної для проведення УЗУО.



Рисунок 4.2 – Схема місцевої вентиляції

У результаті розрахунків встановлено, що швидкість всмоктування повітря у цьому прорізі V_0 має становити 22 м/с, а об'єм повітря, що повинно бути видалене місцевою вентиляцією L_m – 11880 м³.

4.5 Вимоги безпеки праці у надзвичайних ситуаціях

4.5.1 Пожежна безпека

Категорія пожежної небезпеки приміщення (будівлі, споруди) – це класифікаційна характеристика пожежної небезпеки об'єкта, що визначається кількістю і пожежонебезпечними властивостями речовин і матеріалів, які знаходяться (обертаються) в них з урахуванням особливостей технологічних процесів, розміщених в них виробництв [46].

Відповідно до ОНТП 24-86, приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою поділяють на п'ять категорій (А, Б, В, Г, Д) [45].

Можливо зробити висновок, що приміщення лабораторії № 507-9 за пожежонебезпекою відноситься до категорії «Г» (в лабораторії є негорючі речовини та матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскор, полум'я; горючі гази, спалимі рідини, тверді речовини, які спалюються або утилізуються як паливо) [46]. Найбільш пожежонебезпечне місце у лабораторії – місце в якому прокладена електропроводка. Загоряння в приміщенні може виникнути внаслідок короткого замикання в електропроводці [55]. План евакуації із лабораторії у випадку виникнення пожежі наведено на рис. 4.3.

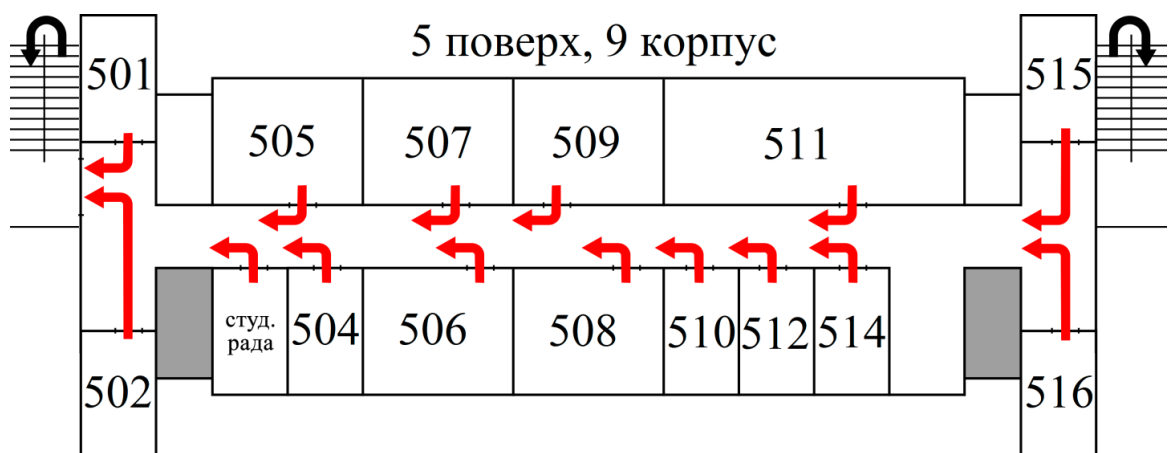


Рисунок 4.3 – План евакуації з лабораторії № 507-9

Із засобів пожежогасіння у лабораторії наявні вогнегасники ОУБ-2. Засобами виявлення та оповіщення про пожежу є автоматичні датчики-сигналізатори типу ДТП. До засобів комунікації та оповіщення співробітників про пожежну ситуацію відноситься внутрішньо-службовий зв'язок. На випадок пожежі існує план евакуації працівників з лабораторії № 507-9.

4.5.2 Безпека праці у аварійних ситуаціях

У випадку, коли стався пробій електричної напруги на корпус ультразвукової установки потрібно, по-перше, відключити рубильник джерела живлення та сповістити про це відповідальну особу за безпеку праці в приміщенні № 507-9 [53, 54].

У разі потрапляння особи під напругу, необхідно відключити ультразвукову установку від мережі, покласти потерпілого на рівну поверхню, підкласти під голову подушку та викликати швидку медичну допомогу за телефоном 103 і, якщо необхідно, надати першу невідкладну допомогу [53, 54].

У разі загорання ультразвукової установки потрібно вимкнути джерело живлення та приступити до гасіння пожежі за допомогою засобів гасіння (вогнегасник, пісок, пожежний кран). Також робітник, який виявив пожежу, зобов'язаний [53, 54]:

- 1) викликати пожежну службу за телефоном 101;
- 2) викликати до місця пожежі відповідальну особу.

У разі отримання травми необхідно сповістити про це відповідальну особу в приміщенні № 507-9 та звернутися в медпункт [53, 54].

4.6 Висновки до розділу 4

1. Проведений аналіз шкідливих та небезпечних факторів передбачає умови, за яких може виникнути небезпека ураження організму. Запропоновано заходи для уникнення травмування в процесі дослідження впливу ультразвукової ударної обробки на жаростійкі властивості титанового сплаву ВТ6.

2. Аналіз умов праці в лабораторному приміщенні засвідчив, що мікроклімат, організація робочого місця та освітлення відповідають вимогам регламентованих санітарних норм, а рівень шуму, ультразвуку та вібрацій не перевищує встановлених допустимих норм.

5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Метою розділу є проведення маркетингового аналізу стартап проекту для встановлення можливості його ринкового впровадження та визначення напрямів реалізації цього впровадження.

5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Ідея проекту направлена на здешевлення та економію ресурсів при виробництві газотурбінних двигунів та збільшення їх ККД (табл. 5.1 та 5.2).

Потенційним товаром даного стартап-проекту є газотурбінні лопатки титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями (рис. 5.1).

Можливість застосування даних композиційних покриттів знаходиться на стадії дослідження, тому на даний момент неможливо навести повну оцінку стосовно ринкової спроможності.

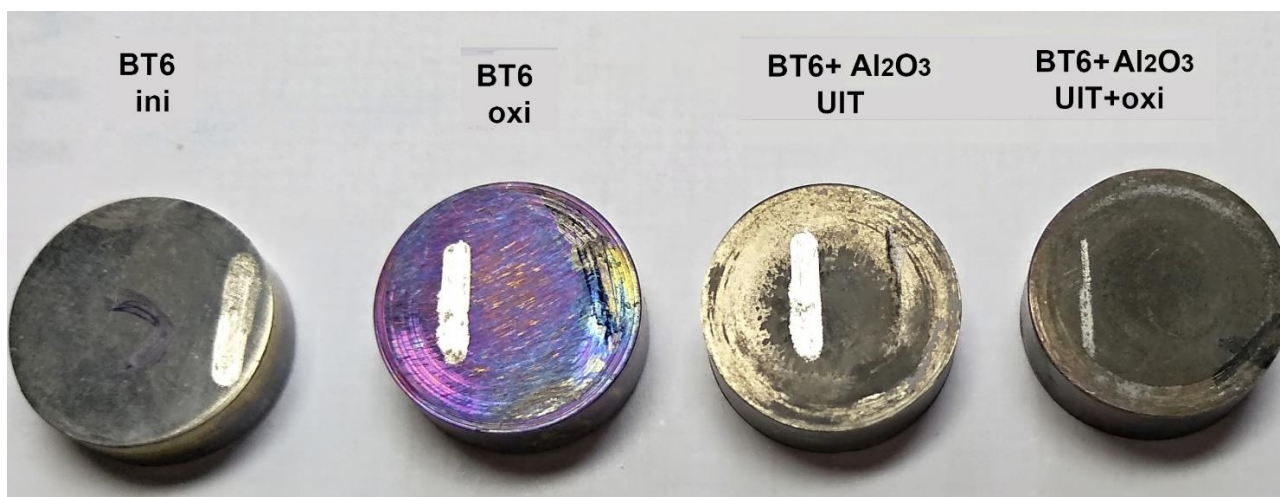


Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд зразків титанового сплаву ВТ6 після ультразвукової ударної обробки із застосуванням різних порошків

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями [56]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди користувача
Створення композиційних покриттів для покращення властивостей газотурбінних лопаток (ГТЛ)	1. Виробництво газотурбінних двигунів (ГТД)	Економія матеріальних ресурсів та фінансових ресурсів
	2. Захисні покриття у промисловості	

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту – розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями

№	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари / концепції конкурентів			
		Наш проект	Конкурент 1 Turbomeca	Конкурент 2 Siemens	Конкурент 3 Solar
Виготовлення ГТЛ					
1	Собівартість виготовлення ГТЛ	S	W	N	W
2	Вартість обслуговування установки для створення ГТЛ	S	N	N	N
3	Екологічність (обсяг відходів)	N	N	S	N
4	Жаростійкість	N	N	S	N
5	Питома міцність	S	N	N	N

* W (слабка сторона), N (нейтральна сторона), S (сильна сторона)

В таблиці 5.3 представлені відомі технології створення композиційних матеріалів.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту – проекту розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями [13]

Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
3D друк ГТЛ	+	Важкодоступна
Вакуумне осадження або імпульсний метод	+	Доступна
Іонно-плазмове та плазмове осадження	+	Доступна
Електронно-променеве осадження	+	Доступна
УЗУО із використанням захисних порошків	+	Легкодоступна

Аналіз таблиці 5.3 свідчить, що дану ідею можливо технологічно реалізувати на виробництві, однак необхідно провести додаткові дослідження для впровадження останнього. Також варто відмітити легкодоступність та низьку собівартість даної технології (табл. 5.2) [56].

Для визначення стану ринку, динаміки та визначення потенційних областей застосування даного стартап-проекту проведено його попередню оцінку (табл. 5.4.).

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту – розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву VT6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	Провідне місце у виробництві ГТД займають: 1) Siemens, 2) Solar, 3) General Electric, 4) Pratt & Whitney.
2	Загальний обсяг продаж, млрд. дол., 2013 рік	15 млрд. 44 млн. дол. (всі виробники)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	В період до 2021 року ринок суттєво зросте, наприклад, компанія General Electric планує збільшити обсяг продаж до 10 разів.
4	Наявність обмежень для входу	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ 17.2.2.04-86, ГОСТ 23537-79, ISO 8178-1: 2017
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку)	> 1

Аналіз даних таблиці 5.4 засвідчив, що ситуація на ринку має всі підстави для можливості виробництва та реалізації ГТЛ. Також варто додати, що більшість основних лідерів зменшать темпи продаж до 2021 року, наприклад, аналітики відзначають, що темпи продажу компанії Siemens знизяться до 2 разів. На їх думку, найголовнішим виробником ГТД в 2021 році стане компанія General Electric [57].

Однак з огляду на той факт, що основні конкуренти не зацікавлені в сегменті ринку малих і середніх потужностей (2,5 МВт – 25 МВт), особливо General Electric та Siemens, а концентрують свою увагу виключно в області виготовлення двигунів великих потужностей (50 МВт – 350 МВт), то можна судити про сприятливий рівень конкуренції для входу на світову арену [57].

У табл. 5.5 визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту – розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Збільшення ККД двигуна	Компанії, що виготовляють ГТД: - Siemens; - General Electric;	Стандарти, технічні регламенти, специфікації, обсяги закупок	Собівартість, час виготовлення та експлуатації, надійність, ліцензія
2	Здешевлення технології виробництва	- Kawasaki motors; - Rolls-Royce; - Solar; - Pratt & Whitney; - Turbomeca;		

Найбільші країни-постачальники: на 2014 рік – США та Німеччина виробляють близько 55 % всіх ГТД у світі [57].

Після визначення потенційних груп клієнтів проведено аналіз стану ринкового середовища (табл. 5.6 та 5.7): розроблені таблиці факторів, котрі сприяють ринковому впровадженню проекту та його реалізації, а також факторів, що йому перешкоджають [56].

Таблиця 5.6 – Фактори загроз стартап-проекту – розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Нестабільність політичної та економічної ситуації	Зменшення темпів інвестування та попиту	Приймання участі у програмах, в тому числі міжнародних, для залучення додаткових інвестицій.
		Зменшення енергетичних та матеріально- технічних ресурсів	Перехід на інші види опалення.

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей стартап-проекту – розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зменшення собівартості технології	Зменшення енерго- та матеріально-технічних ресурсів	Зростання темпів виробництва.
2	Збільшення ККД двигуна	Застосування більш легких матеріалів при виробництві ГТД	Збільшення обсягу продажу та економія ресурсів.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей розроблений на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення (табл. 5.8) [56].

Таблиця 5.8 – SWOT-аналіз стартап-проекту – розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями [57]

Сильні сторони	Слабкі сторони
1	2
Здатність самостійно розробити і виготовити ГТЛ. Виготовити двигуни, більш привабливі для замовників завдяки:	Орієнтованість на масштабні замовлення. Необхідно створити прототип пристрою для виготовлення ГТЛ та продажу ідеї компаніям-виробникам.

Продовження таблиці 5.8

1	2
<ul style="list-style-type: none"> • економічності (в порівнянні з авіаприводними); • більшій компактності та легкості (в порівнянні зі стаціонарними турбінами). <p>Наявність унікальної випробувальної бази для проведення натурних випробувань ГТЛ.</p>	
<p>Можливості:</p> <p>Можливість прийняття участі у закордонних проектах, котрі фінансуються китайськими компаніями. Великий попит ринку Бразилії та країн Перської Затоки щодо ГТЛ.</p>	<p>Загрози:</p> <p>Нестабільність політичної ситуації та відповідно зменшення темпів інвестування і попиту.</p>

Дослідження даної технології виготовлення ГТЛ ще триває, тому неможливо дати повну інформацію стосовно ринкової спроможності та створити маркетингову модель товару. Магістерська дисертація спрямована на дослідження та виявлення фундаментальних явищ, а саме фізико-хімічних процесів, що протікають при синтезі захисних покриттів на поверхні титанового сплаву ВТ6 методом ультразвукової ударної обробки. Синтез композитних захисних покриттів є перспективним способом захисту ГТЛ із титанового сплаву ВТ6, які використовуються при виготовленні ГТД.

5.2 Висновки до розділу 5

1. Аналіз ринкової спроможності стартап-проекту «Розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями», засвідчив, що застосування даної технології у виготовленні двигунів середньої потужності є дуже перспективним, зважаючи на зростання темпів виробництва ГТД.

2. Визначено, що можливість впровадження даної технології, опираючись на огляд потенційних груп клієнтів, незначна. Проте позитивним моментом є те, що головні конкуренти і є потенційними клієнтами, що значно підвищує імовірність співпраці з провідними компаніями в області виготовлення ГТД.

ВИСНОВКИ

1. Доведено можливість підвищення жаростійкості титанового сплаву ВТ6 ультразвуковою ударною обробкою його поверхні із додаванням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$. Найбільш суттєвий ефект за даними гравіметричного аналізу досягається при використанні порошку $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ – втрата маси після циклічного відпалу (нагрів – витримка 5 годин – охолодження) за температури $650\text{ }^\circ\text{C}$ сумарною тривалістю 50 годин зменшується практично втричі порівняно із вихідним зразком сплаву ВТ6 з 28 мг до 10 мг.

2. Підтверджено, що захисні покриття синтезовані шляхом ультразвукової ударної обробки поверхні титанового сплаву ВТ6 із використанням порошків Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ та $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ мають відповідний фазовий та хімічний склад, тобто складаються із подрібнених та ущільнених порошків, зчеплених із матрицею.

3. Товщина синтезованих покриттів до відпалу становить 20 мкм у випадку використання Al_2O_3 та 9 мкм і 16 мкм у випадку використання α - та β -модифікацій Si_3N_4 , відповідно.

4. УЗУО-синтез композитного шару з різних порошків сприяє суттєвому підвищенню корозійної стійкості поверхні сплаву ВТ6 порівняно з необробленим зразком: потенціал корозії зростає з $-0,45\text{ В}$ до $-0,3\text{ В}$. Відпал зразка ВТ6 із сформованим композитним шаром Al_2O_3 додатково покращує електрохімічні характеристики – потенціал корозії досягає значення $-0,2\text{ В}$.

5. Доведено, що ультразвукова ударна обробка титанового сплаву ВТ6 із використанням різних модифікацій Si_3N_4 сприяє покращенню зносостійких властивостей не більше ніж на 5 % – 10 %, а при використанні Al_2O_3 – у 20 разів.

6. Аналіз умов праці в лабораторному приміщенні засвідчив, що мікроклімат, організація робочого місця та освітлення відповідають вимогам регламентованих санітарних норм, а рівень шуму, ультразвуку та вібрацій не перевищує встановлених допустимих норм.

7. Аналіз ринкової спроможності стартап-проекту «Розробка газотурбінних лопаток титанового сплаву ВТ6 із синтезованими на його поверхні захисними покриттями», засвідчив, що застосування даної технології у виготовленні двигунів середньої потужності є дуже перспективним, зважаючи на зростання темпів виробництва ГТД.

CONCLUSION

1. Possibility of the heat resistance increasing of the titanium VT6 alloy by surface ultrasonic impact treatment with addition of Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ and $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ powders was proven. The most significant effect according to the gravimetric analysis was achieved with application of $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ powder – mass loss after cyclic annealing at a temperature of 650 °C with a total duration of 50 hours decreases practically in three times compared with the initial sample of VT6 alloy from 28 mg down to 10 mg.

2. It has been confirmed that protective coatings synthesized by surface ultrasonic impact treatment of the titanium VT6 alloy with Al_2O_3 , $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ and $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ powders have the correspondent phase and chemical composition.

3. The thickness of the synthesized coatings before annealing is 20 μm in the case of Al_2O_3 and 9 μm and 16 μm in the case of α - and β -modifications of Si_3N_4 , respectively.

4. USIT-synthesis of a composite layer from different powders contributes to a significant increase in the corrosion resistance of the VT6 alloy surface in comparison with the initial sample: the corrosion potential increases from -0,45 V to -0,3 V. Annealing of the VT6 sample with formed Al_2O_3 composite layer additionally improves the electrochemical characteristics – the corrosion potential increase for a value of -0.2 V.

5. Ultrasonic impact treatment of titanium VT6 alloy with various modifications of Si_3N_4 improves wear resistance properties in the range of 5 % – 10 %, in case of Al_2O_3 – in 20 times.

6. Analysis of the working conditions in the laboratory showed that microclimate, organization of the workplace and lighting of the workplace the requirements of regulatory sanitary norms, and noise, ultrasound and vibration levels do not exceed the established permissible standards.

7. Analysis of the market capacity of the startup project "Development of gas turbine blades of titanium alloy VT6 with protective coatings on its surface", has shown

that application of this technology in the manufacture of medium-power engines is very promising, given the growth of the production rate of the GTE.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Физическая Энциклопедия. Стробоскопические приборы. Большая рос. Энцикл: Т. 5 / под. ред. А.М. Прохорова – М. Советская Энциклопедия, 1988. – 760 с.
2. Ильин А.А. Титановые сплавы : состав, структура, свойства: справочник / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, И.С. Полькин. – М.: ВИС-МАТИ, 2009. – 519 с.
3. Справочник химика. Титан. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://chem100.ru/elem.php?n=22> – Дата доступа: 22.11.2018. – Справочник химика.
4. Цвиккер У. Титан и его сплавы / У.Цвиккер; пер. с нем. под ред. О.П. Елютина и С.Г. Глазунова. – Москва : Металлургия, 1979. – 511 с.
5. Металловедение титана и его сплавов / С.П. Белов, М.Я. Брун, С.Г. Глазунов. [и др.]; под ред. С.Г.Глазунова и Б.А.Колачева – М.: Металлургия, 1992. – 352 с.
6. Справочник по цветным металлам. Титановые сплавы. Основные характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://libmetal.ru/titan/titan%20osnprop.htm> – Дата доступа: 12.11.2018. – Справочник по цветным металлам.
7. Деформируемые титановые сплавы. Жаропрочные титановые сплавы для деталей ГТД [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://viam.ru/ti_1 – Дата доступа: 12.11.2018. – Деформируемые титановые сплавы.
8. Титанові руди України [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://training.tutkovsky.com/stati/40-titanovi-rudi-ukrayini.html> – Дата доступа: 12.11.2018. – Титанові руди України.
9. Титановые сплавы в машиностроении / Б.Б. Чечулин, С.С. Ушков, И.Н. Разуваева, В.Н. Гольдфайн – Ленинград: «Машиностроение», 1977 – 248 с.

10. Brice D.A. Oxidation behavior and microstructural decomposition of Ti-6Al-4V and Ti-6Al-4V-1B sheet / D.A. Brice, P. Samimi, I. Ghamarian, et al. // Corrosion Science. – 2016. – № 112. – P. 338–346.
11. Frangini S. Various aspects of the air oxidation behaviour of a Ti6Al4V alloy at temperatures in the range 600-700 °C // S. Frangini, A. Mignone, F. De Riccardis // Journal of materials science. – 1994. – № 29. – P. 714–720.
12. Poquillon D. Oxidation and Oxygen Diffusion in Ti-6Al-4V Alloy: Improving Measurements During Sims Analysis by Rotating the Sample / D. Poquillon, C. Armand, J. Huez // Oxid Met. – 2013. – № 79. – P. 249–259.
13. Мубояджян С.А. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД / С.А. Мубояджян, В.П. Лесников, В.П. Кузнецов – Екатеринбург: Изд-во «Квист», 2008. – 208 с.
14. Мовчан Б.А. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме / Б.А. Мовчан, И.С. Малащенко. – Киев: Наукова Думка, 1983. – 232 с.
15. Smrcok L. New Rietveld refinement of kappa-(Al₂O₃) / L. Smrcok, M. Halvarsson, V. Langer, S.A. Ruppi // Zeitschrift fuer Kristallographie. – 2001. – № 216. – P. 409–412.
16. Wei P. Mechanism of titanium deposition on Al₂O₃ ceramic surface by molten salt reaction / P. Wei, H. Qiliang, C. Jian, C. Juan, Y. Huang // Materials letters. – 1997. – № 31. – P. 317–320.
17. Chabri S. Development and Characterization of Al₂O₃ Dispersed Al/Mg/Cu/Ti Matrix Composite / S. Chabri, S. Chatterjee, S. Pattanayak, et al. // J. Mater. Sci. Technol. – 2013. – № 231. – P. 1–6.
18. Zhu J. Reaction Synthesis of TiAl-Al₂O₃ Composites from Ti-Al-Cr₂O₃ / J. Zhu, W. Yang, F. Du // Advanced Materials Research. – 2011. – № 211-212. – P. 209–212.
19. Андриевский Р.А. Нитрид кремния – синтез и свойства / Р.А. Андриевский // Успехи химии. – 1995. – № 64. – С. 4.

20. Zhao Y.X. Microstructural evolution of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ti6Al4V}$ joints brazed with nano- Si_3N_4 reinforced AgCuTi composite filler / Y.X. Zhao, X.G. Song, C.W. Tan, et al. // *Vacuum*. – 2017. – № 142. – P. 58-65.
21. Wang R.R. Silicon nitride coating on titanium to enable titanium–ceramic bonding / Russell R. Wang, Gerhard E. Welsch, Othon Monteiro // *Journal of Biomedical Materials Research*. – 1999. – № 46. – P. 262-270.
22. Özkan Gülsoy H. Properties of powder Al_2O_3 / H. Özkan Gülsoy, S. Özbey, S. Pazarlioglu, M. Çiftci, H. Akyurt // *Int. J. Mater. Mech. Manufact.* – 2016. – № 2. – P. 111.
23. Механические свойства металлов и сплавов / Л.В. Тихонов, В.А. Кононенко, Г.И. Прокопенко [и др.] – Киев: Наукова думка, 1986.
24. Гогоци Г.А. Изучение трещиностойкости керамики на образцах с V-образным надрезом / Г.А. Гогоци // *Проблемы прочности*. – 2000. – № 1. – С. 120-127.
25. Композиционные керамики на основе оксида алюминия полученные методом электроимпульсного плазменного спекания для трибологических применений / М.С. Болдин, Н.В. Сахаров, С.В. Шотин [и др.] // *Физика твердого тела*. – 2012. – № 6. – С. 32-37.
26. Бурмак А.П. Формування структурно-фазових станів при ультразвуковому ударному оброблянні та механічні властивості поверхні алюмінієвого сплаву Д16: дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук : 05.16.01 “Металознавство та термічна обробка металів” / Андрій Петрович Бурмак. – Київ, 2014. – 191 с.
27. Morduk B.N. Fatigue life improvement of α -titanium by novel ultrasonically assisted technique / B.N. Morduk, G.I. Prokopenko // *Materials Science and Engineering*. – 2006. – № 437. – P. 396–405.
28. Васильєв М.О. Ультразвукова ударна обробка поверхневого шару титану BT1-0 в субмікрокристалічному стані / М.О. Васильєв, Б.М. Мордюк,

- Д.В. Павленко, Л.Ф. Яценко // *Металлофизика и новейшие технологии*. – 16.05.2014. – Том 37. – вип. 1.
29. Патент № UA 68264. Ультразвуковий інструмент для деформаційного зміцнення і релаксаційної обробки металів / Г.І. Прокопенко, О.Ф. Луговський, В.І. Чорний та інші; заявл. 18.12.02; опубл. 15.07.04, Бюл. № 7.
30. Хріпта Н.І. Закономірності формування структурно-фазових станів і функціональних властивостей цирконійових стопів за умов ультразвукового ударного оброблення / Н.І. Хріпта // *Успехи физ. мет.* – 2016. – Том 2. – С. 119-152.
31. Lesyk D.A. Microstructure related enhancement in wear resistance of tool steel AISI D2 by applying laser heat treatment followed by ultrasonic impact treatment / D.A. Lesyk, S. Martinez, B.N. Mordyuk, et al. // *Surface & Coatings Technology*. – 2017. – № 328. – P. 344-354.
32. Mordyuk B.N. Wear assessment of composite surface layers in Al-6Mg alloy reinforced with AlCuFe quasicrystalline particles: Effects of particle size, microstructure and hardness / B.N. Mordyuk, G.I. Prokopenko, Yu.V. Milman, et al. // *Wear*. – 2014. – № 319. – P. 84-95.
33. Растровая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ / И.Ю. Пашкеев, О.В. Самойлова, В.И. Гераскин, Т.М. Лонзингер. Под общ. ред. Г.Г. Михайлова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 47 с.
34. Гоулдстейн Дж. Практическая растровая электронная микроскопия / Дж. Гоулдстейн, Х. Яковица – Москва: Мир, 1978. – 656 с.
35. Энгель Л. Растровая электронная микроскопия. Разрушение. Справочник. / Л. Энгель, Г. Клингеле. Пер. С нем. – М.: Металлургия, 1986. – 232 с.
36. Проценко І.Ю. Прилади і методи дослідження плівкових матеріалів / І.Ю. Проценко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2007. – 264 с.

37. Mira 3 LM [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://tescan.ru/products/mira-sem/mira-3-lm/> – Дата доступа: 11.12.2018. – Mira 3 LM.
38. Горелик С.С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд. доп. и перераб. / С.С. Горелик, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев // М.: МИСИС, 1994. – 328 с.
39. Основы рентгеноструктурного анализа в материаловедении / А.А. Клопотов, Ю.А. Абзаев, А.И. Потекаев, О.Г. Волокитин // Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2012. – 276 с.
40. Vasylyev M.A. Corrosion of 2024 alloy after ultrasonic impact cladding with iron / M.A. Vasylyev, B.N. Mordyuk, S.I. Sidorenko, S.M. Voloshko & A.P. Burmak // Surface Engineering. – 2018. – № 34:4. – P. 324–329.
41. Mordyuk B.N. Structure and wear of Al surface layers inforced with AlCuFe particles using ultrasonic impact peening: effect different particles sizes / B.N. Mordyuk, M.O. Iefimov, K.E. Grinkevich, M.I. Danylenko, A.V. Samelyuk // Surf.Coat.Technol. – 2011. – № 205. – P. 5278–5284.
42. Milman Yu.V. Tribological properties of the surface of railway tracks, studied by indentation technique / Yu.V. Milman, K. Grinkevich, S. Chugunova, et al. // Wear. – 2005. – № 258. – P. 77-82.
43. ГОСТ 12.2.032-78 – Організація і обладнання робочих місць.
44. ДСН 3.3.6.042-99 – Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.
45. ДБН В.2.5-28-2006 – Природне і штучне освітлення.
46. Зацарний В.В. Конспект лекцій з дисципліни “Основи охорони праці” / В.В. Зацарний // К.: КПІ, 2014 – 78 с.
47. ДСН 3.3.6.037-99 – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
48. ГОСТ 12.1.012-2004. ССБТ "Вібраційна безпека. Загальні вимоги".
49. ДНАОП 0.00-1.32-01 – Правила побудови та розміщення електроустановок.

- 50.НПАОП 0.00-7.15-18 – Виробничі приміщення, організації і обладнання робочих місць.
- 51.НПАОП 0.00-1.28-10 – Правила охорони праці під час експлуатації ЕОМ.
- 52.ДСТУ 2388-94 – Системи вентиляції. Терміни та визначення.
- 53.Левченко О.Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник / О.Г. Левченко // К.: Основа, 2010. – 240 с.
- 54.Левченко О.Г. Охорона праці: Методичні вказівки до розділу дипломних проектів і робіт для підготовки спеціалістів та магістрів за напрямком 7(8).050504 «Зварювання» усіх форм навчання / О.Г. Левченко // К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 28 с.
- 55.НАПБ Б.07.005-86 – Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
- 56.Гавриш О.А. Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / О.А. Гавриш // Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
- 57.Рыжов С.С. Развитие технологий проектного управления при создании наукоемких продуктов в машиностроении отрасли на примере ГП НПКГ “Зоря” – “Машпроект” / С.С. Рыжов, С.К. Чернов // Shipbuilding&Marine Infrastructure. – 2014. – № 2. – С. 21-26.